

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR
GEOFIZIKUSOK
EGYESÜLETÉNEK
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE
ASSOCIATION
OF HUNGARIAN
GEOPHYSICISTS



Köszönet

A Hawaii-szigeteki vulkánok gravitációs anomáliájának inverziója

Mi mozgatja, mi indítja el a szubdukciót?

Eötvös Loránd, a reneszánsz lelkületű tudós

Az MGE éves rendes közgyűlése

Eötvös Loránd síremlékének koszorúzása

In Memoriam:

Ráner Géza
Dr. Bencze Pál



MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

56. évfolyam (2015) 4. szám



A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

TARTALOM • CONTENTS

SZERKESZTŐSÉGI ROVAT • EDITORIAL

- 187 Köszönet (Acknowledgments) – *Szerkesztőség*

TANULMÁNYOK • PAPERS

- 188 A Hawaii-szigeteki vulkánok gravitációs anomáliájának inverziója (Inversion of the Hawaiian gravity anomalies) – *Toronyi B.*
- 197 Mi mozgatja, mi indítja el a szubdukciót? (What starts and what is driving subductions of lithospheric plates?) – *Kiss J., Bodoky T.*

TUDOMÁNYTÖRTÉNET • SCIENCE HISTORY

- 209 Eötvös Loránd, a reneszánsz lelkületű tudós (Roland Eötvös, the scientist of renaissance character) – *Szabó Z.*

HÍREK • NEWS

- 221 Az MGE éves rendes közgyűlése – *Horváth Zs.*
- 222 Eötvös Loránd síremlékének koszorúzása

IN MEMORIAM

- 223 Ráner Géza – *Fancsik T.*
- 224 Dr. Bencze Pál – *Ádám A., Wesztergom V.*

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

56. évfolyam (2015) 4. szám

A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

Főszerkesztő • Editor-in-Chief

DR. BODOKY TAMÁS

E-mail: bodoky.tamas@mfgi.hu

Szerkesztőbizottság • Editorial Board

DR. BARÁTH ISTVÁN, KAKAS KRISTÓF, DR. LENKEY LÁSZLÓ,

DR. PETHŐ GÁBOR, DR. SZARKA LÁSZLÓ, VERŐ LÁSZLÓ

Technikai szerkesztő • Technical Editor

HOCK GÁBOR

E-mail: hockg@t-online.hu



Lapunk megjelenését a Magyar Olaj- és Gázipari Nyilvánosan Működő Részvénytársaság támogatja

A szerkesztőség a szakcikkeket (tanulmányokat) szaklektorálás után közli. A szaklektorok névsorát az évvégé számban tesszük közzé. A lapban megjelenő cikkek adatainak és állításainak helyességért, ill. közölhetőségéért kizárólag a szerzők tartoznak felelősséggel.

Kiadja a Magyar Geofizikusok Egyesülete
A kiadásért felel: Horváth Zsolt

Szerkesztőség: 1145 Budapest, Columbus u. 17–23.
Telefon/Fax: (1) 201-9815
Titkársági e-mail: postmaster@mageof.t-online.hu
Honlap: www.mageof.hu

Borító, tipográfia és nyomdai előkészítés:
EP Systema Bt., Budapest

Készült: NestPress Kft., 1116 Budapest, Vegyész u. 17–25.
Felelős vezető: Fekete Iván

Előfizethető a Magyar Geofizikusok Egyesületénél
(1371 Budapest, Pf. 433, Telefon/Fax: (1) 201-9815)
egyesületi tagoknak tagdíj ellenében
Megjelenik évente négyszer

INDEX: 26 507
HU ISSN 0025-0120

Köszönet

A *Magyar Geofizika* szerkesztősége köszönetét fejezi ki a lap olvasóinak nevében is azoknak, akik a lap szerkesztésében, illetve színvonalának megőrzésében, javításában az elmúlt 2015. évben közreműködtek.

A hírek, beszámolók szerzőinek nevét mindig közöljük írásuk végén, így ezt nem ismételnünk meg itt, de a köszönet természetesen nekik is szól.

Név szerint is szeretnénk megemlíteni itt azokat, akiknek a neve máshol nem jelent meg.

Köszönet a szacikkek lektorainak!

Ezt a sokszor sok vesződséggel járó munkát az elmúlt évben következő kollégáink vállalták:

Bodoky Tamás, Drahos Dezső, Kis Márta, Kiss János, Kiss Bertalan, Kónya Albert, Madarasi András, Pethő Gá-

bor, Polcz Iván, Szabó Zoltán, Szücs István, Takács Ernő, Tóth József, Wesztergom Viktor, Zilahi-Sebess László

Köszönet a hátlapon közölt képek beküldőinek!

Köszönjük, hogy kérésünkre vették a fáradságot, hogy sok évtizeddel ezelőtti fényképeket keressenek elő és juttassák el hozzánk. A képeket következő kollégáinktól kaptunk:

Polcz Iván, Sedy Judit, Bodoky Tamás.

Végül, de nem utolsó sorban, köszönjük *Hock Gábor* technikai szerkesztőnek a lap igényes külsejét és a szerkesztés magas minőségét, illetve *Petró Erzsébet*nek a lappal járó adminisztráció gördülékeny intézését!

Szerkesztőség

A Hawaii-szigeteki vulkánok gravitációs anomáliájának inverziója

TORONYI B.

Terra Geo Kft., 1121 Budapest, Kikerics utca 4.
E-mail: toronyib@hotmail.com

A számításokhoz a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, USA) által publikált topográfiai és a National Geophysical Data Center (NGDC, USA) által publikált gravitációs adatrendszereket használtam fel. Számításaim célja annak meghatározása volt, hogy a gravitációs adatrendszer inverziójával milyen horizontális és vertikális kiterjedésű ható mutatható ki a kiválasztott köpenyfeláramlásos vulkáni sziget esetében. Az inverziós számítások modellje véges kiterjedésű, függőleges tengelyű, henger alakú ható volt. A gravitációs anomáliák inverzióját szimplex és simulated annealing módszerekkel végeztem. Hawaii fő szigetén lévő vulkánok magmakamráiban lévő sűrűséginhomogenitásokat határoztam meg inverzióval, továbbá a gravitációs anomália hosszú hullámhosszú részét is modelleztem.

Toronyi, B.: Inversion of the Hawaiian gravity anomalies

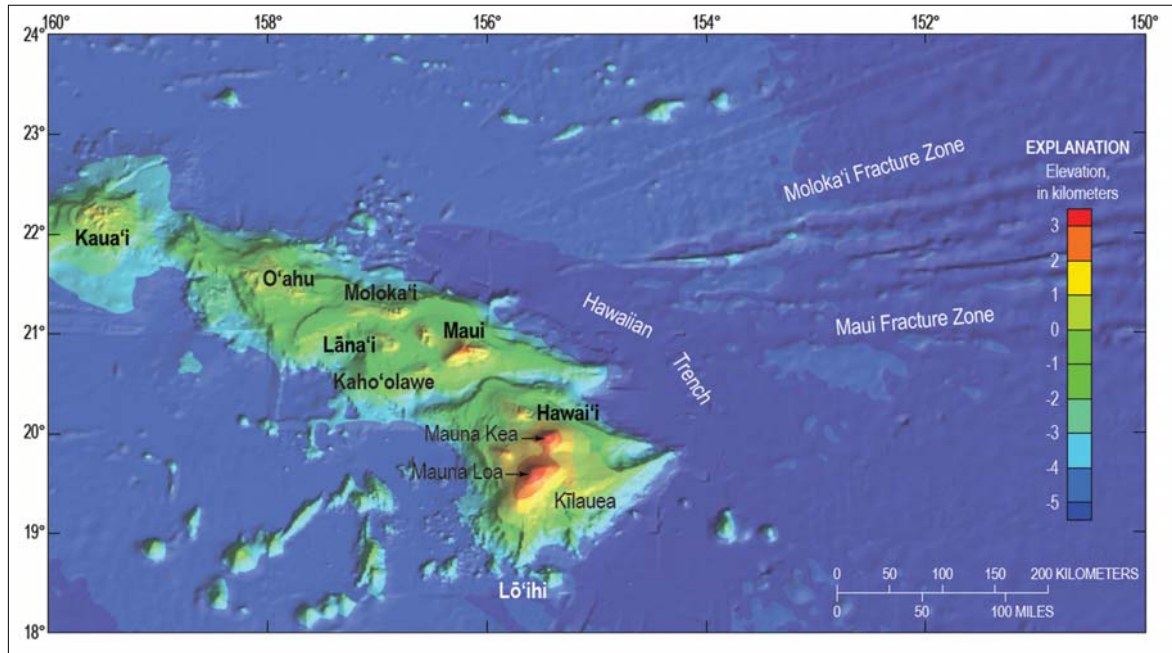
The inversion is based on the topographical data set published by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, USA) and the gravity data set published by the National Geophysical Data Center (NGDC, USA). The aim of the present calculations is the determination of horizontal and vertical extensions of the gravity sources above a volcanic island created by a mantle plum. The direct problem of inversion is a finite length right circular cylinder. The optimum problem is solved by the simplex and the simulated annealing methods. Gaussian and Laplacian parameter distributions of the right circular cylinder are applied. The inversion of the gravity anomalies results the vertical and horizontal extensions of the magma chamber of the Hawaiian volcanoes and the long wavelength gravity anomalies part are modelled, too.

Beérkezett: 2015. november 11.; *elfogadva:* 2016. február 26.

Bevezetés

Hawaii fő szigetének kiterjedése mintegy 10413 km². A nagyobb kiterjedésű gravitációs anomáliákat a mesterséges holdak mérései detektálják, míg a lokális hatók anomáliatere felszíni, illetve tengeri mérésekből állnak rendelkezésre, melyekből Rapp és Basic (1992) állították elő e cikkben felhasznált anomáliákat. Hawaii szigetének közetfizikai paramétereivel számos tanulmány foglalkozik. A Hawaii szigetsoporról (1. ábra) átfogó tanulmányt publikáltak Sherrod és munkatársai 2007-ben. A Hawaii fő szigete a szigetsoport legfiatalabb tagja. A szigeten öt pajzsvulkán található, további két vulkán helyezkedik el a víz alatt. A vulkánok közül ma is aktív az a három, amely a sziget délnyugati részén található, a legfiatalabb még víz alatt van. A szigetnek ezen a részén jelentkező földrengé-

sek epicentruma is egy keleti, és egy délnyugati irányú vetőzóna mentén található. A terület a forrófolt (vagy hotspot) szigetvulkanizmusnak jó példája, gőzök és gázok által a felszínre jutott híg folyós bazalt lávaömlések kevés hamuval. A legidősebb vulkán a Kohala, 0,78 millió évnél is fiatalabb. A radiometriai kormeghatározás a legnagyobb mennyiségű anyagot felszínre hozó bazaltvulkanizmus korát 0,43–0,25 millió évesre teszi. A Kohala, Hualálai és a Mauna Kea vulkánok bazaltja sokkal több alkáli (Na₂O, K₂O) fémeket tartalmaznak, mint a Mauna Loa és Kilauea bazaltjai. A jelen tanulmányban bemutatott gravitációs hatók különböző módon meghatározott paraméterei az anomáliák pontosabb értelmezéséhez járulnak hozzá. Az anomáliák inverziójából kapott eredmények érdekes információkat szolgáltatnak a hatók horizontális és vertikális kiterjedéséről.



1. ábra A Hawaii-szigetek topográfiája (Denlinger, Morgan 2014)
Figure 1 Topography of the Hawaiian islands (Denlinger, Morgan 2014)

Adatok

A National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) az USA díjmentesen elérhető és letölthető adatbázisából az ETOPO1 1 perces felbontású domborzatmodellel számoltam (Amante, Eakins 2009). Gravitációs adatok a National Geophysical Data Center (NGDC) az USA által közzétett „Gravity 1994 Edition CD” anyagából álltak rendelkezésemre (Hittleman et al. 1994). A CD-n található adatsorok közül az alábbi, ún. szabad levegőjű gravitációs (free-air anomália) adatokat használtam fel, amelyeket a gravitációs mérések és a tengerfelszín GEOS3/SEASAT/GEOSAT altimetriai adataiból határoztak meg 1993 márciusában. A Rapp és Basic (1992) által $72 \div -72$ és $0-360$ fokok között az egész Földre 7,5 perces felbontással elkészített térképének egy részlete (2. ábra) mutatja a Hawaii szigetsor free-air anomáliatérképét.

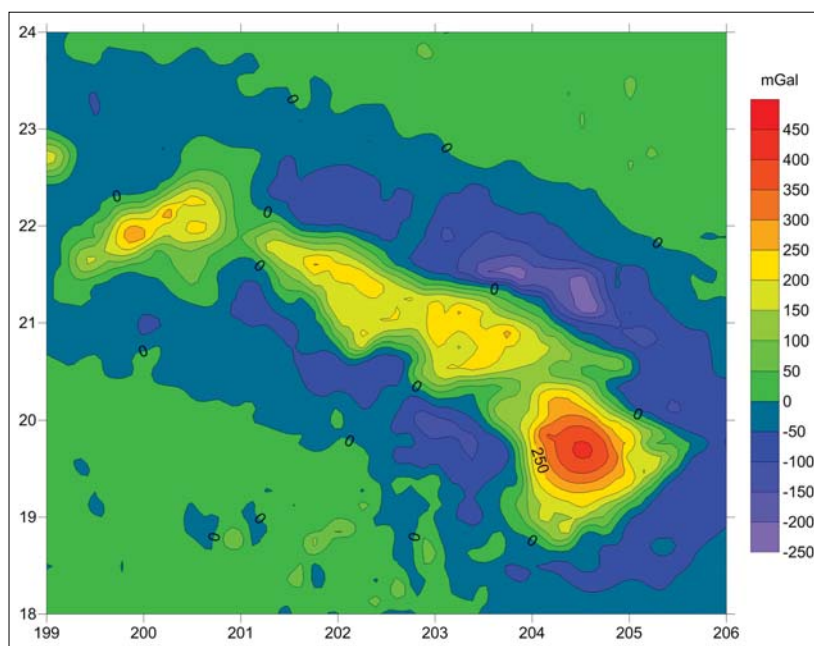
A topográfiai korrekciót az ETOPO1-ből származtatott 500 m-es szintvonalközzökkel számítottam ki, sokszögletű hasáb alakú hatót feltételezve, amelynek a tengerszintre vonatkoztatott hatását határoztam meg Plouff módszerével (1976). Egy n oldalú, sokszögletű prizma ható gravitációs hatásának függőleges komponense:

$$g = G\rho s_m \sum_{i=1}^n \left\{ s_p A [z_2 - z_1] + z_2 \left[\tan^{-1} \frac{z_2 d_1}{PR_{12}} - \tan^{-1} \frac{z_2 d_2}{PR_{22}} \right] - z_1 \left[\tan^{-1} \frac{z_1 d_1}{PR_{11}} - \tan^{-1} \frac{z_1 d_2}{PR_{21}} \right] - P \ln \left[\frac{R_{22} + d_2}{R_{12} + d_1} \frac{R_{11} + d_1}{R_{21} + d_2} \right] \right\}, \quad (1)$$

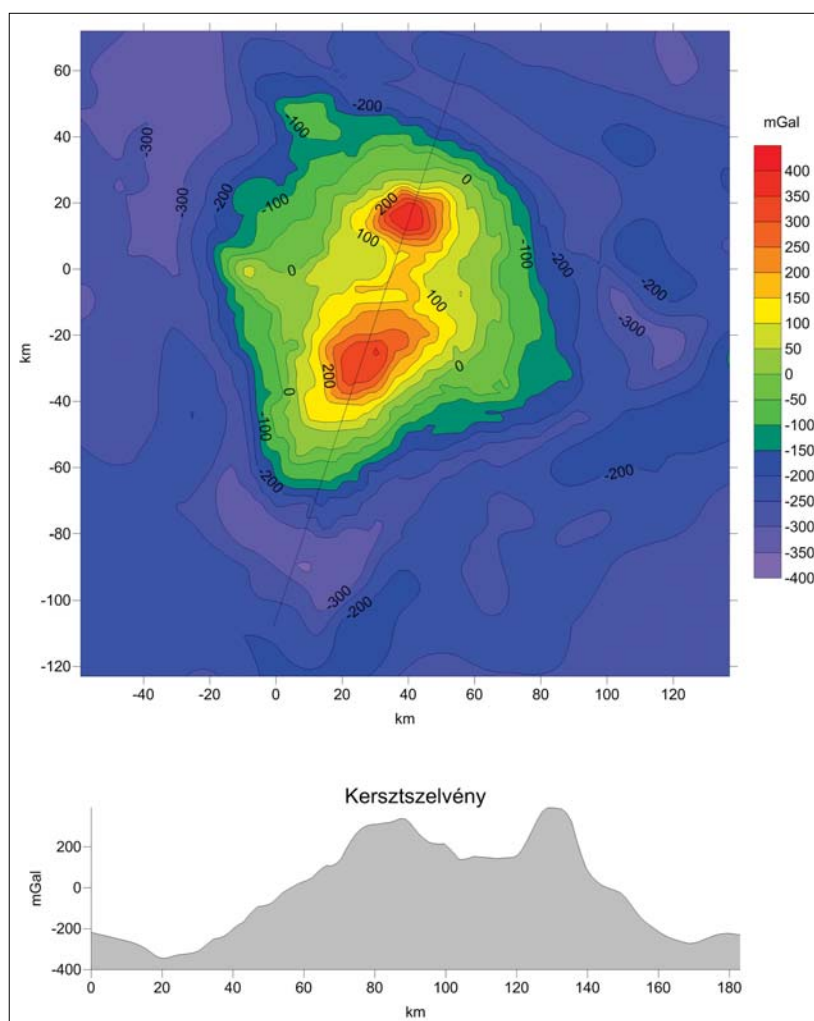
ahol G a gravitációs állandó, ρ a prizma sűrűsége, P a prizma oldalának távolsága a z tengelytől, R a prizma sarkának (sík, sarok) távolsága az origótól, Az a prizma két sarkának z tengelynél mért szöge, z_1 a prizma felső síkjának magassága, z_2 a prizma alsó síkjának magassága, az s_m paraméter (-1) értékű, ha a prizma a terepsík felett van $(+1)$ értékű, ha alatta, az s_p paraméter (-1) értékű, ha P negatív, és $(+1)$ értékű, ha P pozitív. A modellhez 2700 kg/m^3 sűrűséget használtam, melyet a fő szigeten végzett mélyfúrási geofizikai eredmények (Keller et al. 1979) alapján határoztam meg. A mélységkorrekciót a fent leírt topográfiai korrekcióhoz hasonlóan számoltam szintén 2700 kg/m^3 sűrűséget feltételezve. A Veining Meines által meghatározott izosztatikus hatást nem modelleztem (Watts 1978). Mivel a geoid topográfiai arány Hawaii fő szigete esetén $3,5-6 \text{ m/km}$ között változik, így az izosztatikus egyensúly nem állt be, és feltételeztem egy dinamikus hatást is (Sandwell, MacKenzie 1989, Cserepes et al. 2000). A topográfiai és a Bouguer-lemezkorrekciók után megkaptam a Bouguer-anomáliát (3. ábra), ezen végeztem el az inverziót. A kapott eredmény jól korrelál a szakirodalomban található eredményekkel (Denlinger, Morgan 2014, Kauahikaua et al. 2000, Milbert 1991).

Inverzió

Az inverzió során azzal a feltételezéssel éltem, hogy függőleges henger alakú ható okozza az anomáliákat. Az ilyen alakú hatók gravitációs hatásához szükséges egyenleteket a szakirodalomban publikáltak (Nabighian 1962, Nagy 1965). A modell Δg gravitációs terét két, lefelé végtelen kiterjedésű henger terének különbsége adja meg:



2. ábra | Hawaii szabad levegőjű anomáliái (Rapp, Basic 1992)
Figure 2 | Free-air anomalies of the Hawaiian islands (Rapp and Basic 1992)



3. ábra | Hawaii fő szigetének gravitációsanómália-térképe (helyi koordináta-rendszerben)
Figure 3 | Gravity anomalies of the Hawaiian main island (in local coordinate system)

$$\Delta g(\mathbf{m}) = \Delta g^{\text{felső}} - \Delta g^{\text{alsó}}, \quad (2)$$

ahol az \mathbf{m} vektor jelenti a modell paramétereit. Az \mathbf{m} vektor elemei az R sugár és a henger felső ($a^{\text{felső}}$), illetve alsó ($a^{\text{alsó}}$) lapjának a mélysége. A henger gravitációs terét az alábbi egyenletek adják meg:

$$\Delta g^{\text{felső}} = 2G\rho R \left[\frac{1-x^2}{\sqrt{(1+x)^2 + a_1^2}} K + \sqrt{(1+x)^2 + a_1^2} E \right. \\ \left. + \frac{\pi}{2} a_1 [\Lambda_0(\varphi_1, k_1) - 2] \right] \quad (3)$$

$$\text{és} \quad \Delta g^{\text{alsó}} = 2G\rho R \left[\frac{1-x^2}{\sqrt{(1+x)^2 + a_2^2}} K + \sqrt{(1+x)^2 + a_2^2} E \right. \\ \left. + \frac{\pi}{2} a_2 [\Lambda_0(\varphi_2, k_2) - 2] \right], \quad (4)$$

ahol G a gravitációs állandót, ρ a henger sűrűségét, E és K az elsőfajú és másodfajú teljes elliptikus integrálokat, Λ_0 a Heuman-féle lambdafüggvényt jelentik. A (3) és (4) egyenletben szereplő x , a_1 és a_2 változó jelentése $x = x_0/R$, $a_1 = a^{\text{felső}}/R$, $a_2 = a^{\text{alsó}}/R$, ahol x_0 a hengerek közös tengelyétől mért távolság, $a^{\text{felső}}$ és $a^{\text{alsó}}$ a henger alsó és felső lapjának a mélysége. A Heuman-féle függvény φ_1 , k_1 , φ_2 , k_2 paramétereit a

$$k_1^2 = \frac{4x}{(1+x) + a_1^2}, \quad \varphi_1 = \arcsin \frac{a_1}{\sqrt{(1-x)^2 + a_1^2}}, \\ k_2^2 = \frac{4x}{(1+x) + a_2^2}, \quad \varphi_2 = \arcsin \frac{a_2}{\sqrt{(1-x)^2 + a_2^2}} \quad (5)$$

egyenletekkel határozhatók meg. Az inverziót a Bayes-módszer felhasználásával végeztem el, Laplace- és Gauss-eloszlású paraméterek esetére (Box, Tiao 1973, Tarantola 1987, Duijndam 1988a, 1988b, Menke 1989, Gregory 2005, Kis et al. 2011, 2012, 2014). A Bayes-féle következtetés alapegyenlete:

$$p(\mathbf{m}|\mathbf{d}) = p(\mathbf{d}|\mathbf{m})p(\mathbf{m}), \quad (6)$$

ahol \mathbf{d} a mérési adatok vektorát,

$$\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T, \quad (7)$$

N a mérési adatok számát, T a transzponált vektort jelenti. Az \mathbf{m} jelenti a modell paramétereinek vektorát,

$$\mathbf{m} = [m_1, m_2, \dots, m_M]^T, \quad (8)$$

M a paraméterek számát jelenti. A (6) egyenletben $p(\mathbf{m}|\mathbf{d})$ a modell paramétereinek a mérési adatokra vonatkoztatott feltételes valószínűségi sűrűségfüggvényét, $p(\mathbf{d}|\mathbf{m})$ a mérési adatoknak a modell paramétereinek feltételes valószínűségi sűrűségfüggvényét, $p(\mathbf{m})$ a modell paramétereinek valószínűségi sűrűségfüggvényét jelentik. Mind a mérési adatokat, mind a paramétereket a \mathbf{C}_d , illetve \mathbf{C}_M kovarianciamátrixuk jellemzi:

$$\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \sigma_1 \sigma_N \rho_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_N \sigma_1 \rho_{N1} & \cdots & \sigma_N^2 \end{bmatrix}, \quad (9a)$$

$$\mathbf{C}_M = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \sigma_1 \sigma_M \rho_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_M \sigma_1 \rho_{M1} & \cdots & \sigma_M^2 \end{bmatrix}. \quad (9b)$$

A (9a,b) kovarianciamátrixokban $\sigma_1, \sigma_2, \dots$, az adatok, illetve a modellparaméterek szórását, ρ_{ij} a megfelelő korrelációs együtthatót jelenti. A Bayes-féle következtetés (6) alapegyenletében szereplő $p(\mathbf{m})$ a priori valószínűségi sűrűségfüggvény legyen többdimenziós eloszlású:

$$p(\mathbf{m}) = \frac{M \Gamma\left(\frac{M}{2}\right)}{\pi^{M/2} 2^{1+\frac{M}{\kappa}} \Gamma\left(1+\frac{M}{\kappa}\right) |\mathbf{C}_M|^{1/2}} \\ \times \exp\left\{-\frac{1}{2}[(\mathbf{m}-\mathbf{m}')^T \mathbf{C}_M^{-1}(\mathbf{m}-\mathbf{m}')]^{\frac{\kappa}{2}}\right\}, \quad (10)$$

esetünkben $\kappa = 1$ vagy 2 , és Γ a gammafüggvényt, míg \mathbf{C}_M az *a priori* kovarianciamátrixot jelenti. Az (6) alapegyenletben szereplő *likelihood* valószínűségi sűrűségfüggvény

$$p(\mathbf{d}^{\text{mért}}|\mathbf{m}) = \frac{N \Gamma\left(\frac{N}{2}\right)}{\pi^{\frac{N}{2}} 2^{1+\frac{N}{\kappa}} \Gamma\left(1+\frac{N}{\kappa}\right) |\mathbf{C}_D|^{1/2}} \\ \times \exp\left\{-\frac{1}{2}[(\mathbf{d}^{\text{mért}} - \Delta g(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_D^{-1}(\mathbf{d}^{\text{mért}} - \Delta g(\mathbf{m}))]^{\frac{\kappa}{2}}\right\}, \quad (11)$$

ahol az előző egyenletben szereplő \mathbf{C}_D kovarianciamátrixot a $\mathbf{C}_D = \mathbf{C}_d + \mathbf{C}_T$ összefüggés adja meg, itt \mathbf{C}_T az elméleti modell kovarianciamátrixát jelenti. Az *a posteriori* valószínűségi sűrűségfüggvény a

$$p^{\text{a posteriori}} \propto \exp\left\{-\frac{1}{2}[(\mathbf{m}-\mathbf{m}')^T \mathbf{C}_M^{-1}(\mathbf{m}-\mathbf{m}')]^{\frac{\kappa}{2}}\right\} \\ \times \exp\left\{-\frac{1}{2}[(\mathbf{d}^{\text{mért}} - \Delta g(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_D^{-1}(\mathbf{d}^{\text{mért}} - \Delta g(\mathbf{m}))]^{\frac{\kappa}{2}}\right\} \quad (12)$$

formában írható fel.

A minimumfeladat megoldását szimplex és a simulated annealing módszerekkel határoztam meg (Walsh 1975, Kirkpatrick et al. 1983).

A számítások célja az \mathbf{m} paramétervektor értékeinek becslése. Ezt a becslést a (12) a posteriori valószínűségi sűrűségfüggvény maximális értéke határozza meg. Ezzel ekvivalens megfogalmazás a (12) egyenletben lévő exponenciális kifejezésekből álló szorzat pozitív előjellel vett kitevői összegének minimalizálása, így tehát a kitevőkből álló

$$F(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \left[(\mathbf{m} - \mathbf{m}')^T \mathbf{C}_M^{-1} (\mathbf{m} - \mathbf{m}') \right]^{\frac{\kappa}{2}} + \frac{1}{2} \left[(\mathbf{d}^{\text{mért}} - \Delta \mathbf{g}(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_D^{-1} (\mathbf{d}^{\text{mért}} - \Delta \mathbf{g}(\mathbf{m})) \right]^{\frac{\kappa}{2}} \quad (13)$$

egyenlet minimumát kívánom meghatározni az \mathbf{m} vektor függvényében. A simulated annealing Metropolis-féle eljárását a statisztikus fizikából ismert hűlési folyamat analógiájára vezették be. Az eljárás alkalmazása során ki kell választani egy, az állapot (hőmérséklet-) csökkenését leíró függvényt. Jelen esetben szakirodalmi javaslat alapján az alábbi egyenletet választottam:

$$T_k = T_0(1 - k/c)^2. \quad (14)$$

A (14) egyenletben T_k a k -adik lépésben az állapotot jellemző értéket, T_0 a kezdeti állapot értékét, míg c az iterációs lépések számát jelenti.

A C_{ap} a posteriori kovarianciamátrix nemlineáris esetben a

$$\mathbf{C}_{ap} \approx [\mathbf{G}_n^T \mathbf{C}_D^{-1} \mathbf{G}_n + \mathbf{C}_n^{-1}]^{-1} \quad (15)$$

összefüggés alapján határozható meg, ahol a \mathbf{G}_n mátrixot a

$$\mathbf{G}_n = \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial \mathbf{m}} \right)_{\text{meghatározott}} \quad (16)$$

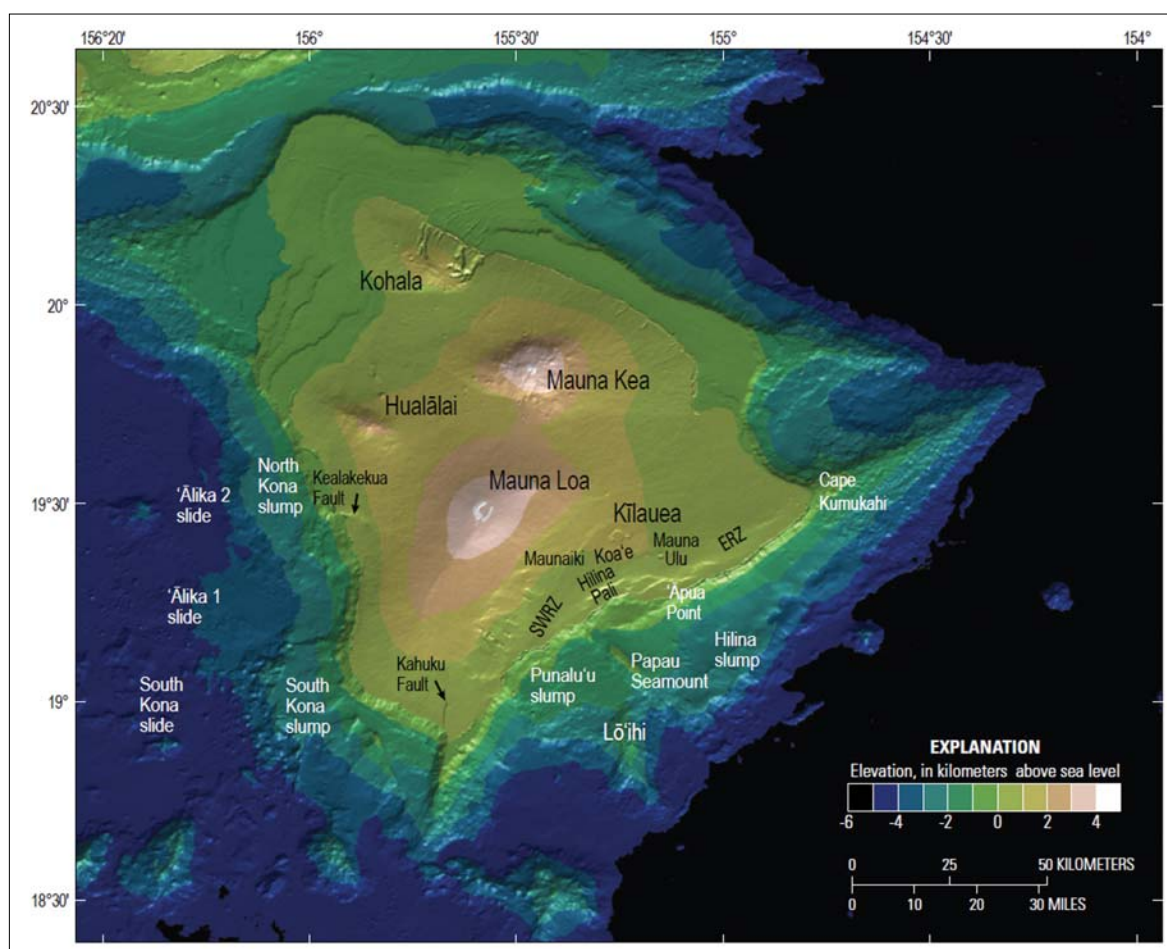
deriválttal definiáljuk. Jelen esetben a modell összetett volta miatt a (16) deriváltat numerikusan, differenciahányadossal közelítettem.

Számításaim során három paraméterértéket: a hengermodell sugarát, tető- és talpmélységét kívántam meghatározni, előre rögzített, ugyanakkor változtatható sűrűség mellett.

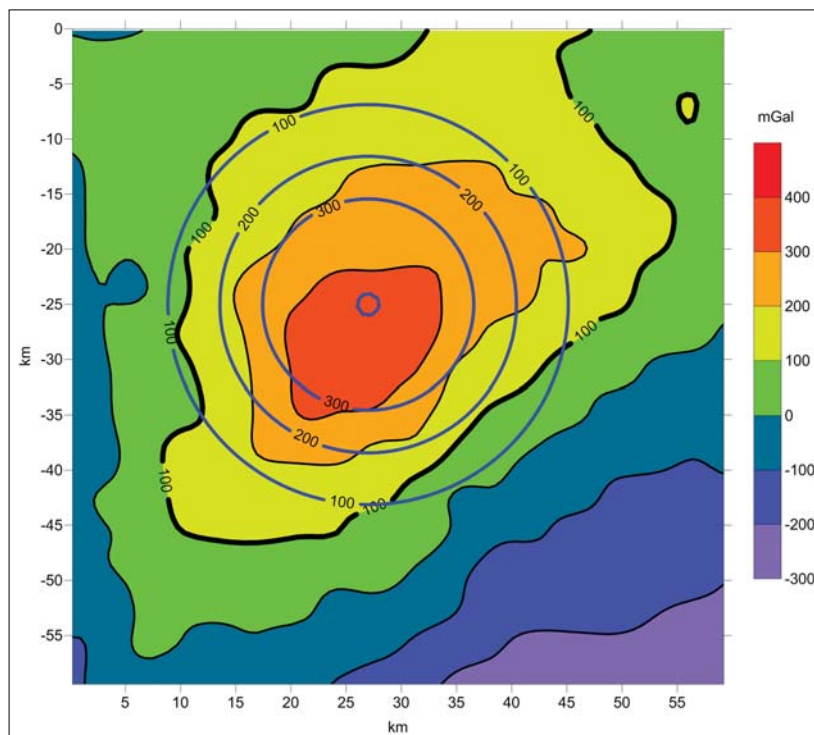
Eredmények és következtetések

A szakirodalom 5 vulkáni területet (Mauna Loa, Mauna Kea, Hualálai, Kohala, Kilauea) különít el, továbbá 2 törési zónát a szigeten belül (keleti, délnyugati terület), ld. *4. ábra* (Denlinger, Morgan 2014, Kauahikaua et al. 2000).

A gravitációsanómália-térképen egyértelműen jól azonosíthatók a Mauna Loa, Mauna Kea, Hualálai, Kohala vulkánok. A Kilauea nem jelentkezik önálló anomáliaként, hanem hatása a Mauna Loa északkeleti kitüremkedéseként észlelhető. Míg a Kohala anomáliája jelentősen kisebb, mint a többi. A fentiek alapján az inverziós számításokat a Mauna Loa, Mauna Kea, Hualálai vulkáni területekre végeztem el (5–7. ábra). Az *apriori* információként felhasználtam, hogy a Moho-felület a tomográfia adatok alapján 12–15 km mélyen helyezkedik el.

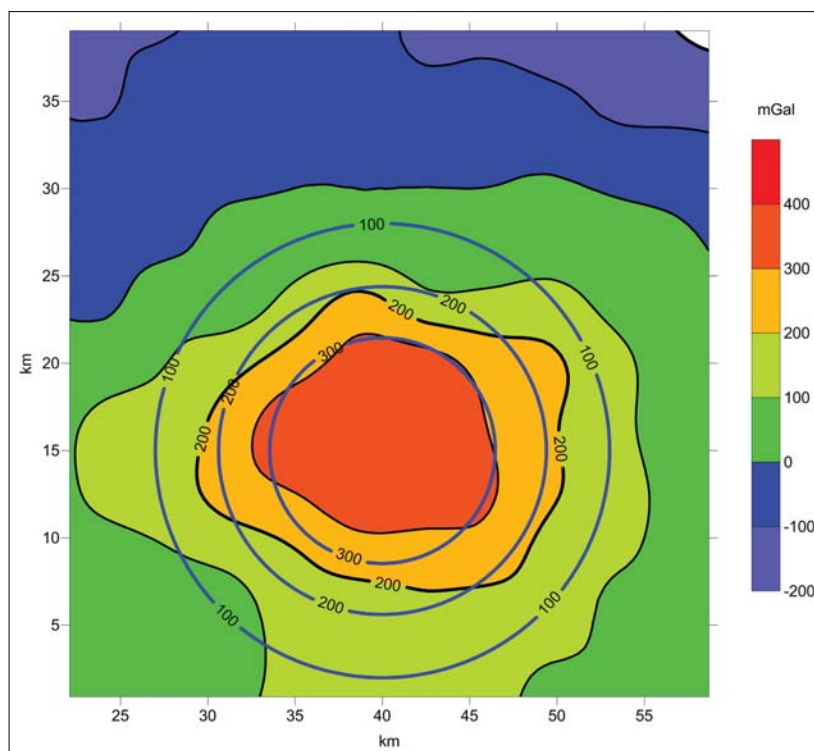


4. ábra	Hawaii fő szigetének topográfiája és főbb morfológiai jellemzői (Denlinger, Morgan 2014)
Figure 4	Topography of the Hawaiian main island and the characteristic morphological elements (Denlinger, Morgan 2014)



5. ábra Mauna Loa gravitációsanomália-térképe és a modellből, az inverzió eredményeként kapott anomália (kék izovonal) az 1. táblázat paramétereivel

Figure 5 Gravity anomalies of the Mauna Loa and the results of the inversion (blue line) according to Table 1

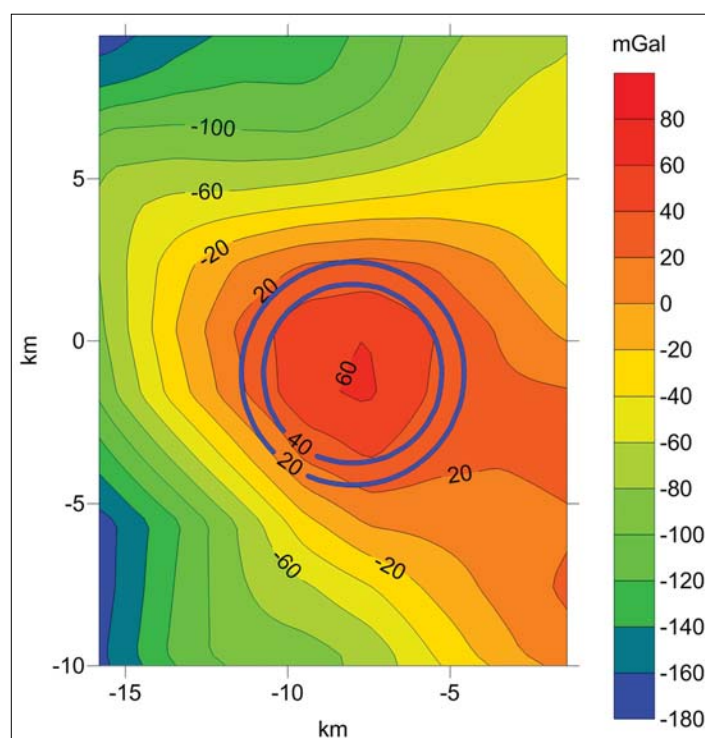


6. ábra Mauna Kea gravitációsanomália-térképe és a modellből, az inverzió eredményeként kapott anomália (kék izovonal) az 1. táblázat paramétereivel

Figure 6 Gravity anomalies of the Mauna Kea and the results of the inversion (blue line) according to Table 1

A simplex-eljárás viszonylag különböző kezdeti paramétereiről indítva is viszonylag kicsi szórással (2%) ugyan azt a megoldást adta mind Laplace-, mind Gauss-eloszlás ese-

tén. A simulated annealing eljárás egyértelműen nagyságrendekkel nagyobb szórással adta a megoldást a kezdeti paraméterek függvényében. A két eljárás ugyanazt az ered-



7. ábra | Hualalai gravitációsanómia-térképe és a modellből, az inverzió eredményeként kapott anomália (kék izovonal) az 1. táblázat paramétereivel

Figure 7 | Gravity anomalies of the Hualalai and the results of the inversion (blue line) according to Table 1

ményt adta a Laplace- vagy Gauss-eloszlás esetén. A sűrűség változása (10%) a sugárra szinte nem volt hatással (1%), míg a ható helyzetére igen, a sűrűség növelésével a ható „nyúlt” és „kúszott” felfelé (5–10%). A kapott eredmények mind kiterjedésükben, mind tömegükben és sűrűségben korrelálnak a szakirodalomban található magmakamra adatokkal (3100–3300 kg/m³, 2–6 km, ld. Kauahikaua et al. 2000, Flinders et al. 2010, Zurek, Williams-Jones 2013), a választott modell korlátain belül. A maradék anomáliából eltávolítva az inverzió eredményét jól láthatóvá válik – ami már az inverzió előtt is látszott –, hogy Mauna Loa nem

teljesen hengerszimmetrikus ható eredménye. Jól kirajzolódik továbbá, hogy van egy ható, mely a Kahuku töréstől tart ívesen Kilauea vulkánig. Ez korrelál a detektált fészekmélységekkel és a tomográfiai adatokkal, becsült mélysége 10–15 km a tengerszintje alatt.

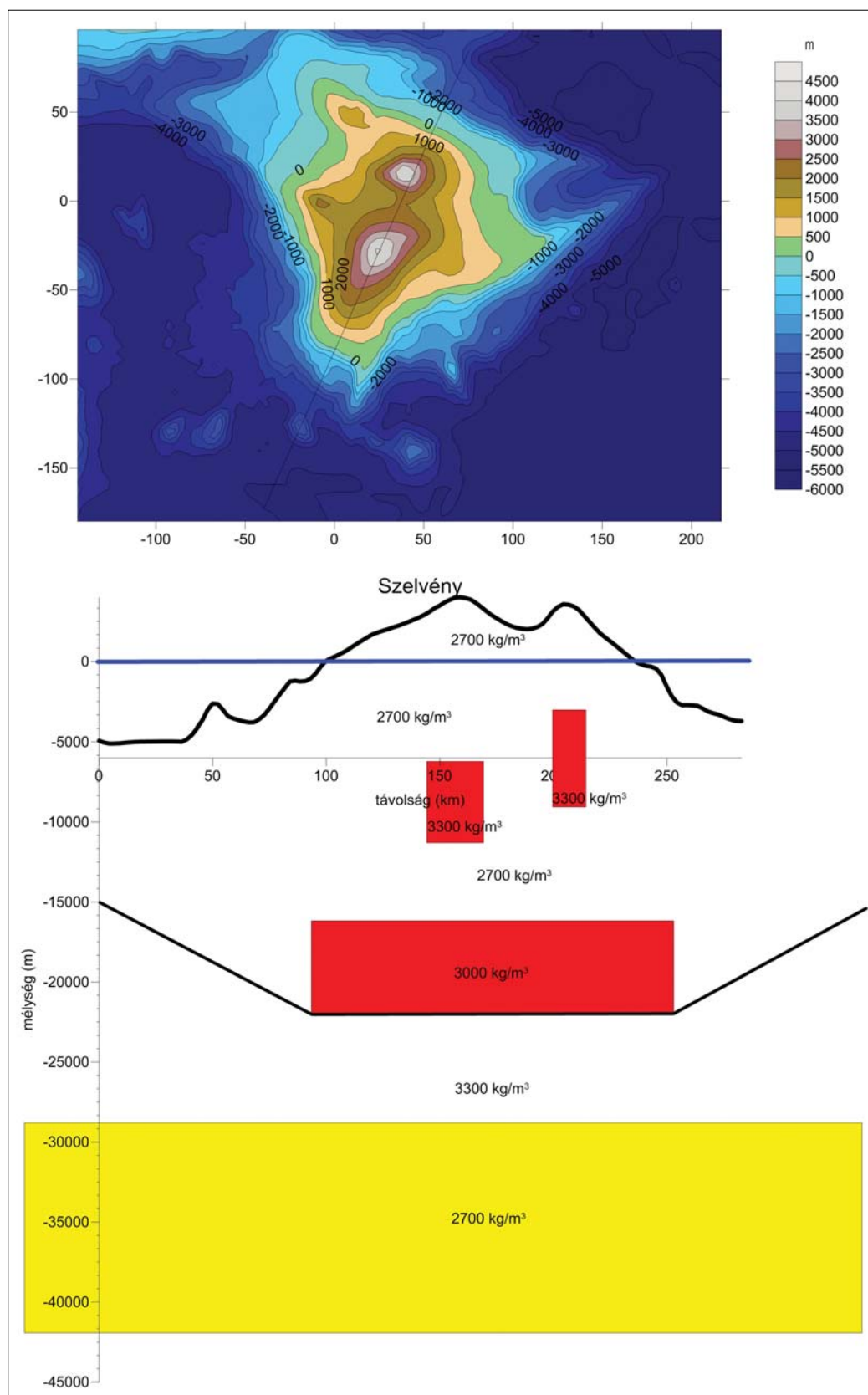
Mivel a hosszú hullámhosszú részt nem távolítottam el, így jól láthatóvá válik a gravitációs anomálián, hogy van egy, a sziget kiterjedésével összevethető méretű pozitív anomália és közvetlen közelében egy negatív (a sziget közepétől kb. 100 km-re –200 ÷ –300 mGal). A gravitációsanómia-térképből kivontam az inverzióval meghatározott rö-

1. táblázat | Eredmények 3300 kg/m³ sűrűséget feltételezve és Laplace-eloszlás esetén simplex-eljárással
Table 1 | Results obtained by assuming 3300 kg/m³ density and using the simplex procedure with Laplacian distribution

	Sugár (km)	Felső sík mélysége (km)	Alsó sík mélysége (km)
Mauna Loa	13,82 ± 6,5	5,79 ± 1,1	10,60 ± 3,1
Mauna Kea	9,09 ± 7,3	3,30 ± 9,4	9,92 ± 8,9
Hualálai	3,31 ± 10	0,28 ± 10	0,71 ± 9,9

2. táblázat | Eredmények 3300 kg/m³ sűrűséget feltételezve és Gauss-eloszlás esetén simplex-eljárással
Table 2 | Results obtained by assuming 3300 kg/m³ density and using the simplex procedure with Gaussian distribution

	Sugár (km)	Felső sík mélysége (km)	Alsó sík mélysége (km)
Mauna Loa	16,08 ± 6,5	3,90 ± 1,1	7,00 ± 3,1
Mauna Kea	9,64 ± 7,3	2,69 ± 9,4	7,67 ± 8,9
Hualálai	a modellparaméterek nem konvergáltak		



8. ábra A tömeginhomogenitások elhelyezkedése és kiterjedése Hawaii fő szigete esetében
Figure 8 Schematic model of gravity sources of the Hawaiian main island

vid hullámhosszú anomáliákat (3 vulkán hatása), így kap-
 tam meg a nagy hullámhosszúságú részt. Ezen elvégezve az
 inverziót az alábbi paraméterű hatót kaptam: sűrűség 3000
 kg/m³, sugár $80 \pm 19,8$ km kiterjedésű, amíg a felső sík $16 \pm$

10 km, az alsó sík 21 ± 12 km mélyen van a tengerszint alatt. Az általam detektált ható lehetséges, hogy a szigetnek az izosztatikus „gyökere” az óceáni kéregben (Watts et al. 1985). A Bouguer-anomálián látszik továbbá egy, a szigettől kb. 250 km-ig tartó negatív anomália ($-50 \div -100$ mGal), mely a köpenyben lévő feláramlás eredménye lehet (McKenzie 1976, Ritsema, Allen 2003). A korábbiakban már alkalmazott inverziós eljárással meghatároztam a ható paramétereit: sűrűség 2700 kg/m^3 , sugár 253 ± 100 km, a felső sík $29 \pm 36,1$ km, az alsó sík $42 \pm 49,1$ km. Ez a köpenyben lévő feláramlás szétterülése lehet a kéreggel való találkozás során (8. ábra).

Míg korábbi cikkünkben (Kis et al. 2007) más égitesteken lévő gravitációs anomáliákat modelleztük jelentősen egyszerűbb morfológiát feltételezve, a modell a földi környezetben is használhatónak bizonyult.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki Kis Károlynak, a konzulensének a hosszú évek során nyújtott folyamatos diszkuszióért.

A tanulmány szerzője

Toronyi Bence

Hivatkozások

- Amante C., Eakins B.W. (2009): ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. doi: 10.7289/V5C8276M [access date]
- Box G. E. P., Tiao G. C. (1973): Bayesian Inference in Statistical Analysis. Addison-Wesley
- Cserepes L., Christensen U. R., Ribe N. M. (2000): Geoid height versus topography for a plume model of the Hawaiian swell. *Earth Planet. Sci. Lett.* 178, 29–38
- Denlinger R. P., Morgan J. K. (2014): Instability of Hawaiian Volcanoes, Characteristics of Hawaiian Volcanoes. In: Poland M. P., Takahashi T. J., Landowsky C. M. (eds.), U.S. Geological Survey Professional Paper 1801, Chapter 4
- Duijndam A. J. W. (1988a): Bayesian estimation in seismic inversion. Part I: Principles. *Geophysical Prospecting* 36, 878–898
- Duijndam A. J. W. (1988b): Bayesian estimation in seismic inversion Part II: Uncertainty analysis. *Geophysical Prospecting* 36, 899–918
- Flinders A. F., Ito G., Garcia M. O. (2010): Gravity anomalies of the Northern Hawaiian Islands: Implications on the shield evolutions of Kauai and Niihau. *J. Geophys. Res.* 115, B08412, doi: 10.1029/2009JB006877
- Gregory P. C. (2005): Bayesian Logical Data Analysis for the Physical Sciences. Cambridge University Press
- Littleman A. M., Dater D. T., Bohman R. W., Racey S. D. (1994): Gravity – 1994 Edition CD ROM and Users' Manual: National Geophysical Data Center, p. 29
- Kauahikaua J., Hildenbrand T., Webring M. (2000): Deep magmatic structures of Hawaiian volcanoes, imaged by three-dimensional gravity models. *Geology* 28/10, 883–886
- Keller G. V., Troebridge G. L., Murray J. C., Skokan C. K. (1979): Results of an experimental drill hole at the summit of Kilauea volcano, Hawaii. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 5/3–4, 345–385
- Kis K., Taylor P. T., Pusztas S., Toronyi B. (2007): A Hold, a Vénusz és a Mars globális gravitációs anomáliái. A Mars négy lokális gravitációs anomáliájának kvantitatív értelmezése. *Magyar Geofizika* 48, 154–164
- Kis K. I., Taylor P. T., Wittmann G., Toronyi B., Pusztas S. (2011): Inversion of magnetic measurements of the CHAMP satellite over the Pannonian Basin. *Journal of Applied Geophysics* 75, 412–418
- Kis K. I., Taylor P. T., Wittmann G., Toronyi B., Pusztas S. (2012): Interpretation of the total magnetic field anomalies measured by the CHAMP satellite over a part of Europe and the Pannonian Basin. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 47, 130–140
- Kis K. I., Taylor P. T., Wittmann G. (2014): A földi mágneses tér gradienseinek meghatározása mesterséges holdak méréseiből és a kurszki mágneses anomália inverziója, *Magyar Geofizika* 55, 150–162
- Kirkpatrick S., Gelatt Jr. C. D., Vecchi N. P. (1983): Optimization by simulated annealing. *Science* 220, 671–680
- McKenzie D. (1976): Surface deformation, gravity anomalies and convection. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 48, 211–238
- Menke W. (1989): Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. Academic Press Inc., San Diego, New York, Boston, Sydney, Tokyo, Toronto
- Milbert D. G. (1991): GEOID90: A high-resolution geoid for the United States. *Eos Trans. AGU* 72/49, 545–554
- Nabighian N. M. (1962): The gravitational attraction of a right vertical circular cylinder at points external to it. *Pageoph.* 53, 45–51
- Nagy D. (1965): The evaluation of Heuman's lambda function and its application to calculate the gravitational effect of a right circular cylinder. *Pure and Applied Geophysics* 62, 5–12
- Plouff D. (1976): Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections. *Geophysics* 41/4, 727–741
- Rapp R. H., Basic T. (1992): Ocean-wide gravity anomalies from GEOS-3, Seasat and Geosat altimeter data. *Geophysical Research Letter* 19/19 October, 1979–1982
- Ritsema J., Allen R. M. (2003): The elusive mantle plume. *Earth and Planetary Science Letter* 207, 1–12
- Sandwell D. T., MacKenzie K. R. (1989): Geoid height versus topography for oceanic plateaus and swells. *Journal of Geophysical Research* 94, 7403–7418
- Sherrod D. R., Sinton J. M., Watkins S. E., Brunt K. M. (2007): Geologic map of the State of Hawai'i. U.S. Geological Survey Open-File Report 2007, 1089 [http://pubs.usgs.gov/of/2007/1089/]
- Tarantola A. (1987): Inverse Problem Theory. Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation. Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo
- Walsh G. R. (1975): Methods of Optimization. John Wiley and Sons, London, New York, Sydney, Toronto
- Watts A. B. (1978): An analysis of isostasy in the world's oceans. 1. Hawaiian-Emperor seamount chain. *Journal of Geophysical Research* 83/B12, 5989–6004
- Watts A. B., ten Brink U., Buhl P., Brocher T. (1985): A multi-channel seismic study of lithospheric flexure across the Hawaiian-Emperor seamount chain. *Nature* 315, 6015, 105–111
- Zurek J. M., Williams-Jones G. (2013): The shallow structure of Kilauea caldera from high-resolution Bouguer gravity and total magnetic anomaly mapping. *J. Geophys. Res.* 118, 3742–3752, doi: 10.1002/jgrb.50243

Mi mozgatja, mi indítja el a szubdukciót?

KISS J.[@], BODOKY T.

Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (MFGI), 1143 Budapest, Stefánia út 14.

[@]E-mail: kiss.janos@mfgi.hu

A cikk azt vizsgálja, hogy milyen erők játszanak közre egy litoszférolemez alábukásánál (szubdukciójánál). Áttekinti a lemezmozgásokat és a lemezekre ható erőket, számszerűen is vizsgálja az óceáni litoszféra kihűléséből adódó sűrűségváltozást. Áttekinti a földköpenyben lejátszódó konvekciós áramlásokat, és végül arra a következtetésre jut, hogy ezeknek a szerepe a szubdukció megindításánál sokkal jelentősebb, mint a kihűlésből adódó sűrűségkülönbségnek.

A kontinentális lemez kora évmilliárdokban mérhető, miközben az óceáni lemez kora mindössze néhány 100 millió év. Mindebből arra következtethetünk, hogy az óceáni kéreg képes alábukni és megújulni, miközben a kontinentális kéreg a kisebb sűrűsége miatt erre képtelen, ami a rajta található kőzetek korában meg is mutatkozik. Az óceáni lemezek anyaga aktívan forog a konvekciós köráramban, míg a kontinentális lemezé nem. Adódik tehát, hogy a kontinentális lemezek mind a mai napig megőrizték a kezdeti szétszakadási formáikat.

Kiss, J., Bodoky, T.: What starts and what is driving subductions of lithospheric plates?

The paper studies the driving forces of subductions of lithospheric plates. Plate movements and plate driving forces are briefly reviewed, density differences caused by cooling are numerically studied and mantle convections are looked over. It reaches the conclusion that the role of mantle convections at subductions is much more significant than that of density differences.

Beérkezett: 2015. december 3.; *elfogadva:* 2016. március 23.

1. Bevezetés

Több publikációban, cikkben is találkozhatunk a szubdukálódó lemez mozgásának fizikai magyarázatával. Ezt a következőképpen foglalhatnánk össze:

„Az óceáni lemez, a felszínhez közel, idővel kihűl s ezért sűrűsége nagyobb lesz, mint akár az alatta vagy akár a mellette lévő lemezek sűrűsége. Ez a sűrűségkülönbség húzza lefelé a szubdukálódó óceáni lemezt, amely süllyedésének köszönhetően megnyúlást is okoz. (Ez a folyamat a felelős, például a Pannon-medencei kéreg kivékonyodásáért, az extenzióért, mert a mélybe szubdukálódó óceáni lemezrész húzza magával a felső lemezrész.)”

Érdekes azonban ehhez egy konkrét idézetet is elővenni a *Wikipédia* – szabad enciklopédia – weboldaláról, ahol a lemezmozgás meghajtóerőiről a következőket találjuk:

„A kéreglemezek az óceáni litoszféra viszonylagos sűrűbb volta és az asztenoszféra gyengése miatt mozoghatnak. A lemezt tektonikához a földköpenyből származó hő elnyelődése nyújtja az energiát, de az a feltevés, hogy a le-

mezek az asztenoszféra konvekciós áramlatain passzívan mozognak, már nem elfogadott. Ehelyett a lemezmozgást a szubdukciós zónákban lesüllyedő óceáni litoszféra nagyobb sűrűsége hajtja. Amikor az óceánközépen kialakul, az óceáni litoszféra még kevésbé sűrű, mint az alatta lévő asztenoszféra. Idővel, ahogy hűl és vastagodik, sűrűbbé válik, s emiatt a szubdukciós zónákban lesüllyed.”

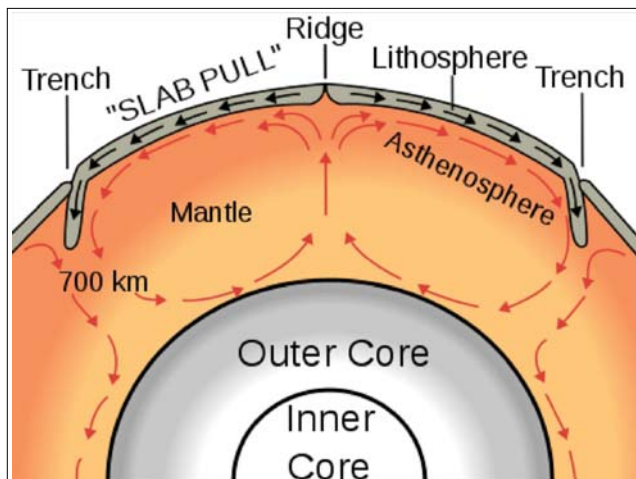
A *Wikipédia* oldalain is meg szoktak jelenni a fontosabb forrásművek. Ebben a fejezetben, ahol a meghajtóerőkről lenne szó, nincs idézet, nincs hivatkozás, amire a wikipédia fel is hívja a figyelmet.

Az a felfogás, hogy a lemezek az asztenoszféra áramlatain passzívan mozognak, csak annyiban vethető el, hogy a lemezek nem passzívak, mert eltérő tulajdonságaik miatt „aktívan” közreműködnek. Ez persze nem jelenti azt, hogy a konvekciós köpenyáramlatokat ki lehet hagyni a magyarázatból!

Bízva abban persze, hogy a jelenséget rajtunk kívül talán mindenki pontosan érti, és csak a nem teljes körű tárgyalás okozza a félreértésünket, szükségesnek éreztük a kérdést még egyszer körüljárni.

2. Lemezmozgások

A merev litoszféramezeket az asztenoszféra képlékeny anyagának konvekciós áramlásai mozgatják (1. ábra). Ez az anyagáramlás a lemeztektonika meghajtóereje, és különböző cikkekben, bemutató anyagokban hasonló ábrákkal

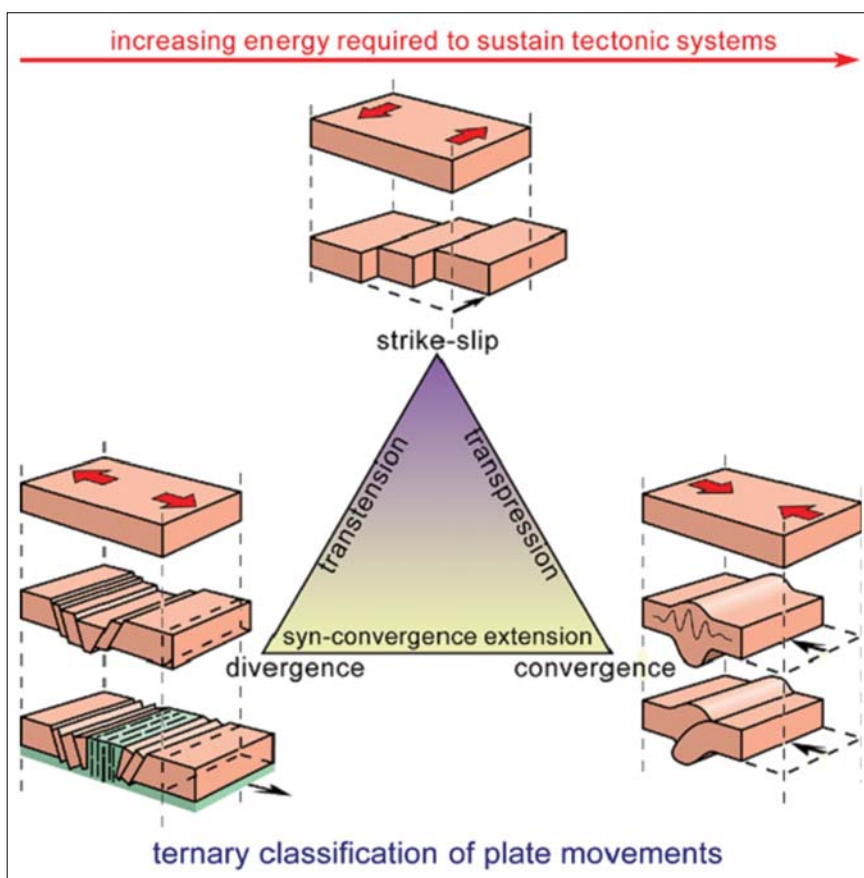


1. ábra
Figure 1

Konvekciós köpenyáramlás, a lemezek mozgatója
Mantle convections, the driving force of plates

gyakran találkozunk. A litoszféramezek ennek az anyagáramlásnak köszönhetően a felszínen egymással kölcsönhatásba kerülnek. A lemezperemek mentén a kölcsönhatás három fő típusát (2. ábra) különíthetjük el:

1. *Divergens mozgások* (távolodás, szétnyílás): két lemez egymáshoz viszonyított, távolodó mozgása. Ilyenek például a kontinentális riftzónák és az óceánközépi hátságok. Az erők ellentétesek, a határvonalra (közel) merőlegesek és a határvonaltól kifelé mutatnak. A határvonal (hasadék) mentén jelentkező konvekciós feláramlás miatt bazalt vulkanizmus (bazalt feláramlás) jelentkezik, és gyakoriak a földrengések.
2. *Transzform mozgások* (eltolódások, oldalmozgások): két lemez egymáshoz viszonyított vízszintes elmozdulása egy határfelület mentén. Ilyenek például az óceáni kéregben jól azonosíthatóan jelentkező transzform vetők vagy éppen a Szent András-törésvonal is É-Amerika Ny-i partvidékén. A lemezeket mozgó erők ellentétesek vagy egyirányúak, de eltérő nagyságúak, és a határfelülettel (közel) párhuzamosak. A határfelület mentén feszültségek alakulnak ki, amit a gyakori földrengések jeleznek, viszont nincs vulkáni működés, és nincs hegységképződés a vonal mentén.



2. ábra
Figure 2

Főbb lemezmozgások osztályozása és az átmenetek lemeztektonikai mozgásai (Burg 2011). Az ábrán balról a lemezek távolodása, fent párhuzamos elcsúszása, jobbról az ütközése látható, a piros nyíl irányában egyre nagyobb energiára van szükség a rendszer működésének fenntartásához
Ternary classification of plate movements (Burg 2011)

3. *Konvergens mozgások* (torlódások, gyűrődések): két lemez egymáshoz viszonyított, közeledő mozgása. Ilyen mozgások okozzák a szubdukciót az óceán–óceán, illetve óceán–kontinens ütközés során, illetve a kollíziót kontinens–kontinens ütközés esetén. A lemezeket mozgó erők ellentétesek, a határfelületre (közel) merőlegesek, és mindkét lemez oldaláról a közös határfelület felé mutatnak. A határfelülettel párhuzamosan földrengések (Benioff-zóna) és a lebukó kéreg újraolvadása miatt aktív vulkanizmus figyelhető meg (pl. Kamcsatka vagy a Japán szigetek vulkáni ívei). Az ütköző zónában felgyűrődő kőzetanyagból, illetve a vulkanizmus hatására hegységek, hegységrendszerek alakulnak ki (pl. Andok, Alpok, Kárpátok, Himalája).

A lemeztectonikai mozgások során a transzform mozgások, a konvekciós áramlás irányának megváltozása miatt átalakulhatnak konvergens és divergens lemezmozgásokká, és fordítva. Ezt az átmenetet a főbb mozgási fázisok között mutatja be a 2. ábra.

A mozgásban lévő lemezek között bárhol fennállhat a sűrűségkülönbség (összetételből és korkülönbségből adódóan), mégis csak a konvergáló (értsd, összetorlódó) lemezek esetén van szubdukció! A szubdukció a litoszféramezek eléggé összetett jelensége és nem szabad szűken csak az alábukást látni és magyarázni, a tágabb környezet hatásait is figyelembe kell venni.

3. A lemezekre ható erők

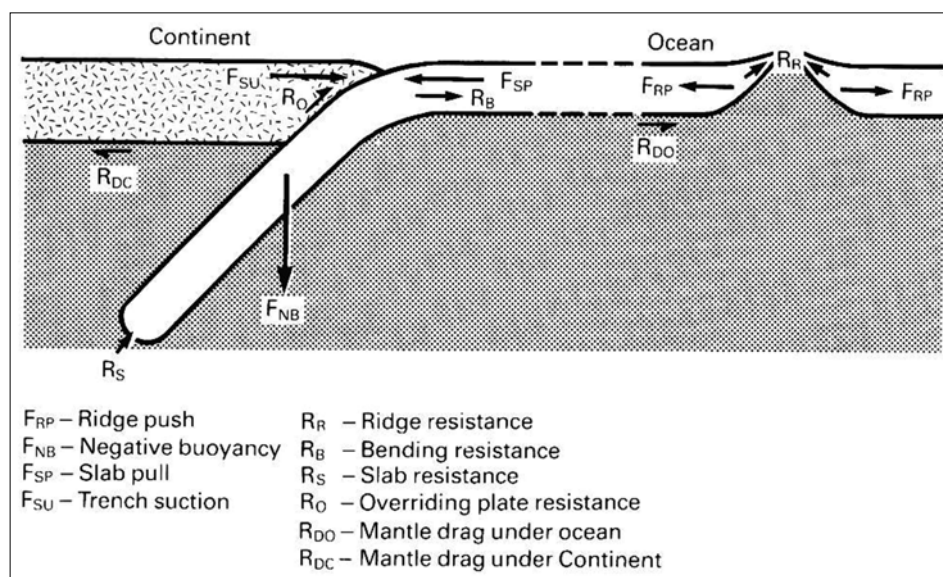
A hibák egyik részét jól példázza, amikor a szubdukálódó lemez mozgási mechanizmusát vizsgálva az asztenoszfért

passzívnak tekintik, vagyis azt az erőt, amely a konvergens lemezmozgásért felelős, nem veszik figyelembe. Például Kearey és Vine (1990) a szubdukciót meghatározó erők ismertetésekor így fogalmaz: „The asthenosphere’s role in this scenario was considered to be essentially passive.”^{a)} A leírás a szerzők részéről korrekt, annál is inkább, mert ők is hivatkoznak korábbi tanulmányokra, ugyanakkor kérdés, hogy mit lehet egy ilyen „scenario”-val megmagyarázni (3. ábra).

Meg kell említeni, hogy sok forrásmű anélkül, hogy tudatosítaná a köpenyáramlások figyelmen kívül hagyását, átveszi ezt a mozgatóerőket csak részben bemutató vázlatot. Ha a köpenyáramlások által okozott erőket is felrajzoljuk, akkor Newton törvénye (hatás–ellenhatás) miatt a 3. ábra több erővektora ellentétes irányúra fog változni!

A kinematikai vázlattal kapcsolatban a következő kérdések vethetők fel:

1. Hogyan alakul ki a szubdukció, amikor még nincs alábukó lemez, amely a súlyával húzhatná?
2. Ha az alábukó lemezt a súlya húzza lefelé, akkor a kb. néhány száz 100 km-es lemezdarabnak ellene tart egy több ezer vagy több tízezer kilométer kiterjedésű összefüggő lemez (amely az alábukástól az óceánközépi hátságig tart), amely a saját tehetetlensége és a súrlódás miatt akkora erőt képvisel, hogy az alábukó lemez súlyától mozgás nem nagyon várható!
3. A hátság tolóereje erősen kérdéses, mert a hátság nem a felnyomulók, majd a felszínen megszilárduló bazaltok tolóereje miatt keletkezik, hanem azért ott jön fel a bazalt, mert a divergens lemezhatárok között megjelenő „üres” teret tölti ki, tehát nem a bazalt nyomja szét a lemezt, hanem a köpenyáramlás a kinyíló lemezek közé hozza fel a bazaltot, megszüntetve az anyagihiányt (pl. Csontos 1998). A

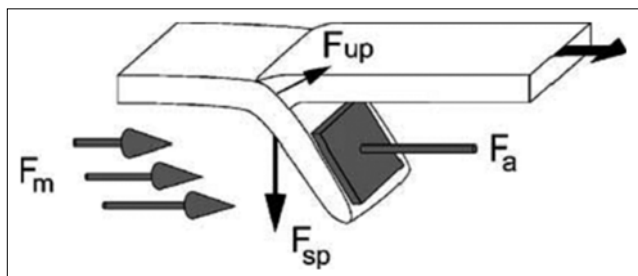


3. ábra | A szubdukció kinematikája (Forsyth, Uyeda 1975) a köpenyáramlás hatása nélkül. (F_{RP} – a hátság nyomóereje, F_{NB} – lefelé hajtó erő, F_{SP} – lemez nyomóerő, F_{SU} – lebukás szívóereje; R_R – hátság ellenállása, R_B – a lehajlás ellenállása, R_S – szubdukálódó lemez ellenállása, R_O – felemelkedő lemez ellenállása, R_{DO} – köpenyellenállás az óceán alatt, R_{DC} – köpenyellenállás a kontinens alatt)

Figure 3 | Subduction kinematics without mantle convections (Forsyth, Uyeda 1975)

szétnyílásért, a bazaltok feláramlásáért és a látszólag tolóerőnek tűnő mozgásért így a köpenyáramlások a felelősek.

Vannak persze a bemutatott kinematikai modellel eltérő magyarázatok is, pl. Heuret és Lallemand (2005) nyomóerőként egyértelműen a köpeny mozgásáról beszélnek („pressure force generated by mantle flows”^{b)}), lásd 4. ábra.



4. ábra A szubdukció során ható legfőbb erők (Heuret, Lallemand 2005). (F_m – nyomóerő, amely a konvekciós köpenyáramlásból származik, F_{sp} – az ütközés miatt lefelé irányuló nyomóerő (a megnövekedett tömeg súlya), F_{up} – az ütközés miatt felfelé irányuló nyomóerő (az alsó közeg megtartó ereje), F_a – szubdukálódó lemezt visszatartó erő (tehetetlenség)

Figure 4 Principal forces at a subduction (Heuret, Lallemand 2005)

A 4. ábrán a megtartó erő (F_a) nagysága az alsó és a felső lemez, illetve az alattuk lévő köpeny anyagának mozgási sebességkülönbségéből származik, mert mindkettőt a köpenyáramlás hajtja, (akár ellentétes irányban is), és ez határozza meg a szubdukálódó lemez dőlésszögét. Az ábrán a felső lemez mozgását mutató nyíl akár fordított irányú is lehetne.

Noha az alábukás során a lemezek közötti sűrűségkülönbségnek kitüntetett szerepe van (ezt mindenki belátja), akkor sem ez határozza meg elsődlegesen a szubdukciós lemez mozgását a felső 20–80 km-ben, hanem a konvekciós áramlásból származó meghajtóerő (1. ábra), amely irtózatosan nagy tömeget, adott esetben egy hatalmas óceáni litoszférolemezt hajt meg és tart mozgásban!

Ha nem lenne a konvekciós áramlásból származó konvergáló lemezmozgás, lemezeket összenyomó mozgatóerő, akkor valószínűleg szubdukció sem lenne! A sűrűségkülönbség – legalábbis kezdetben megítélésünk szerint – éppen csak arra elég, hogy az egyik lemez lefelé, a másik pedig, felfelé mozduljon el az ütközéskor a lemezhatáron.

A kontinentális kéreg sűrűsége 2700–3000–3300 kg/m³, az óceáni kéregé 3000–3300 kg/m³ között változik, mivel

hiányzik a felső kéreg. A kétféle kéreg sűrűsége a felső kéregtől eltekintve azonosnak mondható, mivel a bazaltos óceáni kéreg és a bazaltos összetételű metamorf kőzetekből álló kontinentális alsó kéreg sűrűsége hasonló. A kéreg alatti köpeny litoszférasűrűségéről nincsenek pontos adataink ($\sigma_M > 3300 \text{ kg/m}^3$), de feltételezésünk szerint ez közel azonos. Viszont a kéreg (kontinentális vagy óceáni) sűrűsége kisebb, mint a köpeny sűrűsége (ezzel kapcsolatban különböző elképzelések ismertek, de kevés konkrétumot lehet találni). A kontinentális és óceáni lemezek találkozásánál az alábukó lemez nyilvánvalóan az óceáni lesz, körülbelül 10%-os sűrűség-többlete és a topográfiailag mélyebb helyzete miatt. Az óceáni–óceáni lemeztalálkozáskor a helyzet már nem ennyire egyértelmű, mert a litoszféra szintjén elenyésző sűrűségkülönbség származhat a kihülésből (lásd később).

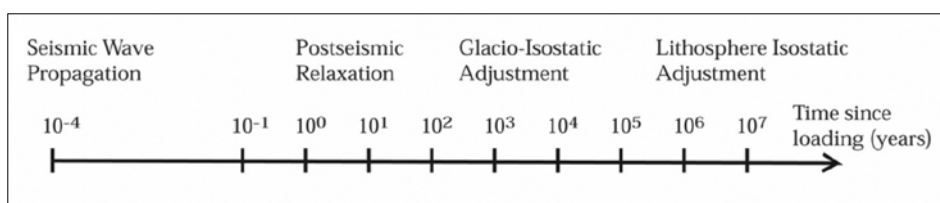
A lebukó hideg lemez egy adott mélységtől egy nagyobb sűrűségű közegbe fog belenyomódni, és az izosztázia alapján feltételezhetjük, hogy addig süllyed a lemez, amíg a tolóerők és a megtartó erők egyensúlya ki nem alakul.

Az izosztatikuss mozgások alapján azt mondhatjuk, hogy a hegyek gyökérszónáinak kialakulása néhány száz 10 Mévet igényel. A gyökérszónák a kezdeti felszíni körülményeknél sokkal nagyobb hőmérséklet- és nyomásviszonyok közé kerülnek, átalakulásuk a litoszférában, alkalmazkodásuk a környezet paramétereire igen hosszú ideig tart (ez lehet több 10 Mév). Ebből adódóan – az analógia folytán – a szubdukálódó lemeznek is valószínűleg hosszú idő kell, hogy felvegye a környezeti paramétereknek megfelelő ásvány-, kőzettani, illetve kémiai formát, miközben a konvekciós áramlások rendkívül nagy (~5–15 cm/év) sebességgel tolják. Ezek az (ásvány-, kőzettani, illetve kémiai) átalakulások az asztenoszféra képlékeny anyagában viszonylag gyorsan lefolynak, de a szilárd litoszférában ehhez valószínűleg több időre van szükség.

Példaként nézzük meg a különböző litoszférában lezajló földtani hatásokat az időskálán (5. ábra). Látszik, hogy:

- a földrengéshullámok terjedése: órák, percek (10^{-4} év),
- a földrengések utáni relaxáció (átrendeződés): néhány év ($1-10$ év),
- a glaciális izosztikus hatások kiegyenlítődése: néhány ezer év (10^3-10^4 év),
- a litoszféra izosztikus kiegyenlítődése: tíz millió években mérhető (10^6-10^7 év).

Az izosztikus egyensúly kialakulása több millió évbe telik. A köpenybe nyomuló kéregkőzetek átalakulása köpenykőzetekké valószínűleg ennél is sokkal hosszabb folya-



5. ábra Litoszférában lejátszódó folyamatok időigénye években (Thatcher, Pollitz 2008)
Figure 5 Time demands of the lithospheric processes (Thatcher, Pollitz 2008)

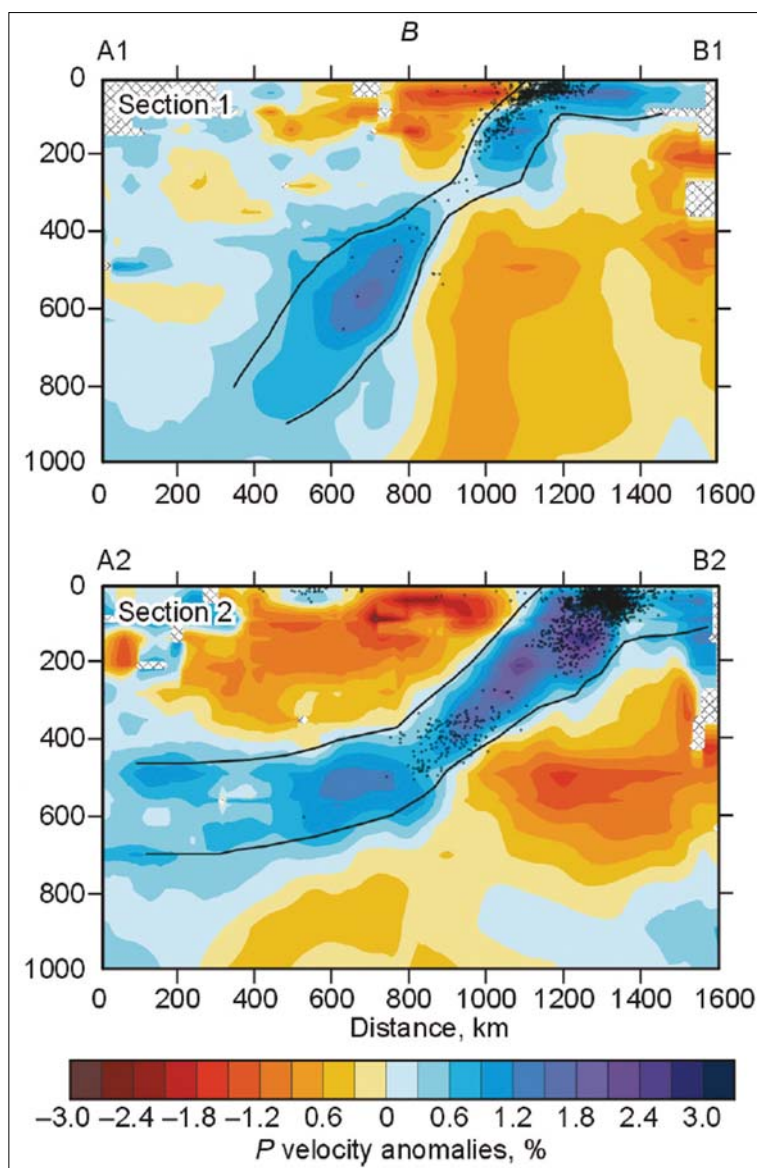
mat. 10 cm/év sebességgel számolva 10 Mév alatt 1000 km-t fog haladni az óceáni kéreg, amiből az adódik, hogy ilyen sebesség mellett nem tud az anyag átalakulni, azaz kéregközetek fognak benyomulni a köpenylitoszférába, még hozzá kisebb, a kéregre jellemző sűrűséggel. Ebből a megfontolásból kiindulva az az erő, amely a lemezt lefelé viszi a litoszférában, egyértelműen a konvekciós áramlásból származó gyors tolóerő lesz. A rendszer alapvetően egyensúlyi állapot elérésére törekszik, és nem bukna le a szubdukálódó lemez, ha nem lenne a tolóerő.

A hegyek többletsúlyának kompenzálására néhány év-millió alatt izosztatikus gyökérszóna jön létre (kivastagodik a kéreg – lokális izosztázia, vagy meghajlik a litoszférolemez – regionális izosztázia) azért, hogy az egyensúly visszaálljon. A szubdukciós lemez feltételezett többletsúlyának a hatása azonban teljesen más formában jelentkezik, egy lemez-szerű test nyomul be ferdén a litoszférába, illetve aszteno-

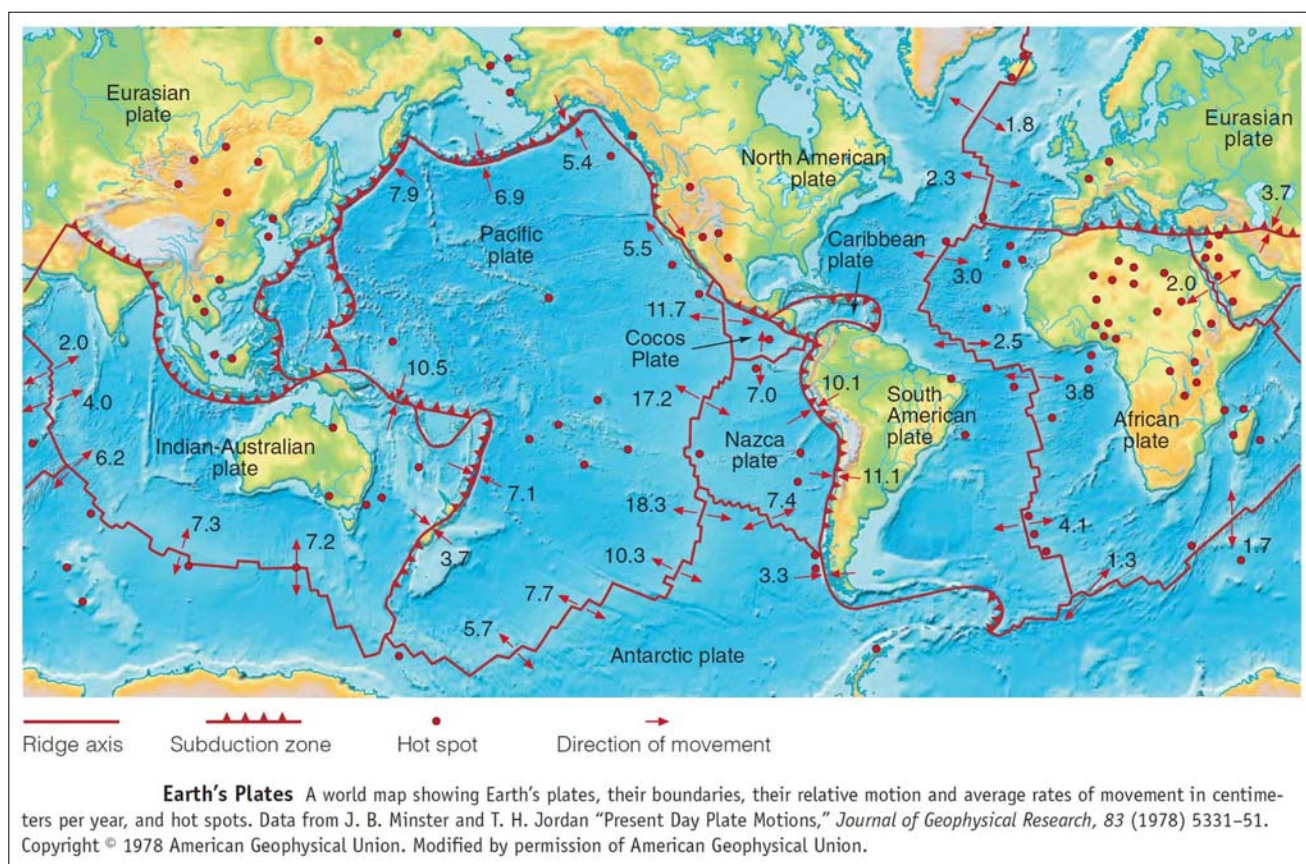
szférába. Ezt passzív szeizmikus mérések alapján több helyen ki is mutatták (6. ábra). Ez a folyamat földtani időben mérve csak egy gyors, erős és irányított tolóerő miatt következhet be, mert a lassú izosztatikus kiegyenlítődés nem ilyen formát eredményezne.

Érdekes módon a passzív szeizmikus mérésekből csak az óceán–kontinens között konverzió során kialakult szubdukciók mutatnak ilyen szép képet, mint amit a 6. ábra alapján láthatunk, mert itt a felszíntől megvan az 5–10% sűrűségkülönbség a két lemez között, amit a sebességanómáliák vissza is tükröznek.

A lemezhatárok elhelyezkedése is érdekes ebből a szempontból (7. ábra). Sok helyen találunk az óceán–kontinens peremen lemezhatárt, de ez mégsem tekinthető általánosnak. Találunk lemezhatárt az óceánokon és a kontinenseken belül is, amelyek egyszer konvergens, másszor divergens határok. Mint említettük, az óceáni lemez ott kezd el süllyedni, ahol



6. ábra | Szubdukció a passzív szeizmika alapján Kamcsatka partjainál (Dobretsov et al. 2012). A fekete pontok a földrengés-hipocentrumokat jelzik
Figure 6 | Seismic image of the subduction at the eastern shoreline of Kamchatka (Dobretsov et al. 2012)

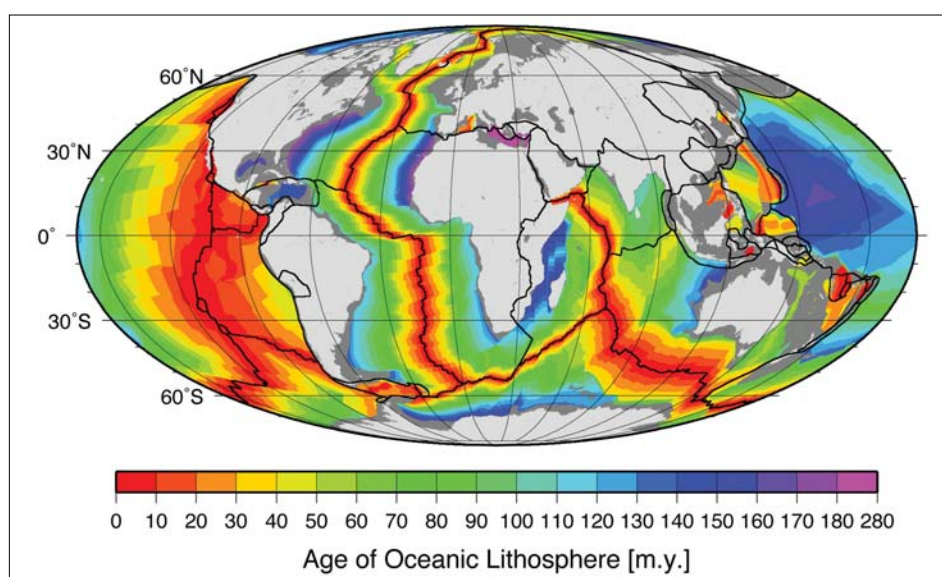


7. ábra A főbb lemezhatárok, lemezmozgások és „hotspot” helyek a Földön (Minster, Jordan 1978). A mozgási irányok mellé írt számok a mozgás sebességét jelzik cm/év egységben

Figure 7 The main plates, plate movements and hot spots on the Earth (Minster, Jordan 1978)

konvergens, azaz vele ellentétes irányban mozgó, álló vagy lassabban mozgó óceáni, vagy kontinentális lemezbe ütközik (lemezhatár). Minél nagyobb a sebessége a konvekciós áramlásnak (a lemez mozgásának), annál valószínűbb a szubdukció.

A Közép-atlanti óceáni hátság kinyílási sebessége (1,8–3,0 cm/év) kisebb, mint a Csendes-óceáni hátságé (5,7–18,3 cm/év), így az Atlanti-óceán partjain nincs szubdukció, a Csendes-óceán partjain viszont van (lásd 7. ábra).



8. ábra A hátságok mentén kialakuló bazaltos óceáni litoszféra kora (Muller et al. 2008)

Figure 8 The age of oceanic lithosphere in My-s (Muller et al. 2008)

Úgy néz ki, hogy az Atlanti-óceán partjai nem is lemezhatárok, mert a kontinensek kezdtek el egymástól távolodni, mintegy maguk után húzva az egyre növekvő területű óceáni kérget. Vagyis a kontinentális és óceáni kéreg valószínűleg egy lemezt alkot, együtt mozog.

Természetesen számít az óceáni lemez kora. A lemezek kora a hátságoktól távolodva folyamatosan nő (8. ábra), a legidősebb óceáni kéreg kora 200 Mév körül van, ezek tehát a legnagyobb sűrűséggel rendelkező óceáni kéregrészek. Ilyen lemezt találunk:

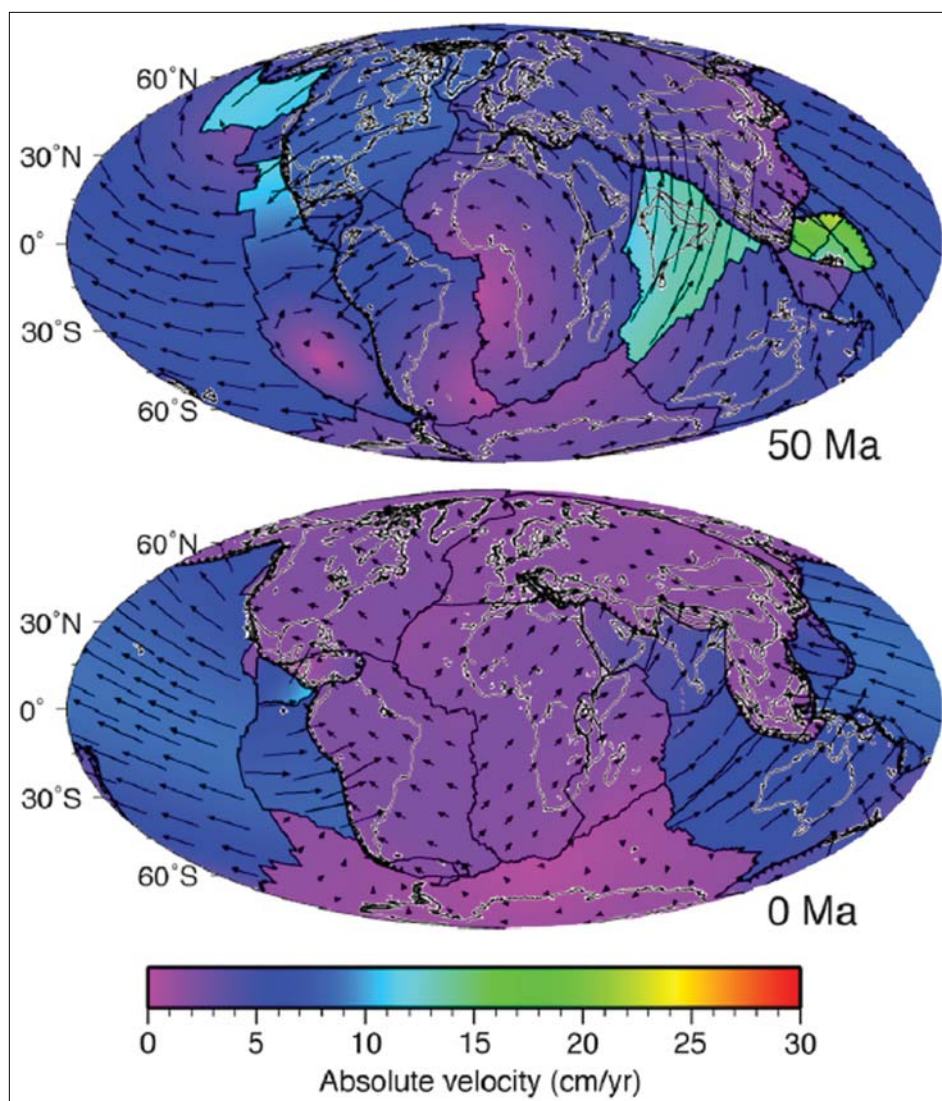
1. É-Amerika K-i partvidékén (nincs szubdukció, nem bukik alá),
2. É-Afrika Ny-i partvidékén (nincs szubdukció, nem bukik alá),
3. K-en a Mariana-árok nál (itt erőteljes szubdukció van).

A legidősebb óceáni lemez – a feltételezés alapján – egyben a legnagyobb sűrűségű lemez is. Miért nem bukik a

kontinentális lemez alá az óceáni kéreg Afrika Ny-i és Amerika K-i partjainál? Valószínűleg azért, mert még nincs lemezhatár, a kontinens és óceán ugyanazon a köpenyáramláson utaznak.

Feltehető, hogy lemezmozgás sebessége, pontosabban az ütköző lemezek egymáshoz viszonyított sebessége igen fontos tényező (7. ábra). Lehet, hogy a lemezek kölcsönös sebessége határozza meg azt, hogy van-e lemezhatár vagy nincs, illetve, hogy kialakul-e szubdukció vagy sem.

Az 8. ábra mutatja az óceáni kéreg korát. Az ábrán jól látszik, hogy az óceáni hátságokkal párhuzamosan jelennek meg az azonos korú óceáni kéregképződmények, és a sávok szélessége jelzi a terjedés sebességét is. A piros szín szélessége azt mutatja, hogy az elmúlt 10 Mév alatt hol volt a hátság kinyílása a legjelentősebb. A széles piros sávoknál, a lemezperemnek a hátsággal ellentétes oldalán mindenhol szubdukciót figyelhetünk meg. Az ábrán az is látszik, hogy a kihülésből származó sűrűség-többlet nem lehet döntő, mert nincs szubdukció É-Amerika és É-Afrika Atlanti-óceáni



9. ábra | A lemezmozgások iránya és sebessége (cm/év egységben) 50 millió éve és napjainkban (Zahirovic 2015)
Figure 9 | Direction and absolute velocity of plate movements 50 My-s ago and at present (Zahirovic 2015)

partszakaszán, noha 200 Mév-nél is idősebb az óceáni lemez, viszont van szubdukció D-Amerika Csendes-óceáni partszakaszán, ahol pedig az óceáni lemez csak 50 Mév körüli! A szubdukció tehát elsősorban nem az óceáni kéreg érettségétől függ, hanem a lemezek konvergáló mozgásának sebességétől!

Napjainkban, a GPS-mérések alapján, már a mozgás iránya is többé-kevésbé pontosan meghatározható, sőt a földtani régmúlt mozgásviszonyaira (lásd Zahirovic 2015) is lehet következtetni (9. ábra). Tulajdonképpen a mozgások iránya, nagysága behatárolja a főbb litoszférolemezek helyzetét. Az ábrán látszik, hogy lemezek egyesülhetnek vagy kettőtörhetnek, megváltoztatva ezzel a lemezperemek helyzetét. Látszik továbbá, hogy a lemezek eltérő sebességgel mozognak, és a sebesség nagysága kapcsolatba hozható a szubdukció megjelenésével. Egy adott relatív sebesség alatt – úgy tűnik – nincs szubdukció.

4. Kihűlésből származó sűrűségváltozás

A fentiekben röviden áttekintettünk a litoszféra szintjén a lemeztektonikával és a lemezek mozgásával kapcsolatos ismereteket. Közelítsük meg a kérdést a fizikai paraméterek oldaláról is! Vizsgáljuk meg a sűrűségváltozást, annak mértékét, például a hőmérséklet-csökkenés hatására!

Adott az óceáni kéreg, amely lehül – ekkor csökken a térfogat, nő a sűrűség – a következő összefüggés szerint:

$$\rho_1 = m/V_1 = m/(V_0(1 + \beta\Delta T)) = \rho_0/(1 + \beta\Delta T),$$

ahol

m – a test tömege,

ρ_0 – kezdő sűrűség,

ρ_1 – végső sűrűség,

V_0 – kezdő térfogat,

V_1 – végső térfogat,

β – térfogati hőtágulási együttható (10^{-5} nagyságrendű),

ΔT – hőmérsékletváltozás.

Sűrűség: Az alsó kéreg sűrűsége 5–15 km mélységben $\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$.

Hőmérséklet: 15 km mélyen a hőmérsékletet pontosan nem tudjuk, de 10 km-es mélységben, a legmélyebb fúrások alapján 300°C hőmérséklet van, ezért 15 km-re vegyük a 450°C -os értéket. A hőmérséklet-változás mértéke tehát $\Delta T = \sim 450^\circ\text{C}$ körüli.

Sűrűségváltozás: A bazalt hőtágulási tényezője 100°C -on $\beta = 0,9 \times 10^{-5} [1/^\circ\text{C}]$ nagyságú. Az egyszerűség kedvéért számoljunk ezzel az értékkel, mintha a hőtágulási tényező egy konstans, hőmérséklettől független érték lenne.

Ha 15 km mélyről a felszínre emelünk egy bazaltot, akkor 450°C -ot változik a hőmérséklete, a sűrűsége pedig

$$\rho_1 = \rho_0/(1 + \beta\Delta T) = 3000/(1 - 0,000009 \times 450) = 3012 \text{ kg/m}^3.$$

Legyen a mélységváltozás 35 km, akkor a minimális 50 mW/m^2 hőáram esetén kb. 800°C lesz hőmérséklet-változás. Ekkor a sűrűség értéke

$$\rho_1 = \rho_0/(1 + \beta\Delta T) = 3000/(1 - 0,000009 \times 800) = 3021 \text{ kg/m}^3.$$

130 mW/m^2 hőáram esetén a hőmérséklet-változás 2000°C körüli lesz, ekkor a sűrűség értéke

$$\rho_1 = \rho_0/(1 + \beta\Delta T) = 3000/(1 - 0,000009 \times 2000) = 3054 \text{ kg/cm}^3.$$

A bazaltok keletkezési hőmérséklete $\sim 950^\circ\text{C}$ körüli, ennél nagyobb hőmérséklet-változás az óceáni kéreg esetében nem várható. Ekkor viszont a kihűlésből származó sűrűségváltozás elenyésző (max. 1%), ami képlékeny anyag áramlásához talán elegendő lenne, de egy szilárd és merev lemez mozgatásához kevésnek tűnik. Gondoljunk bele, hogy normál földmodell esetén a Moho-szint mélységében (5–10 km mélység az óceánok, 25–50 km a kontinensek esetében) a sűrűség már 3300 kg/m^3 körüli! Ebből adódóan a szubdukálódó kihűlt óceáni lemez meddig süllyedhet?

A sűrűséggel való indoklás tehát annyiban korrekt, hogy a felszín közelében a kontinentális lemez kisebb sűrűségű (gránit-granodiorit összetételű, 2700 kg/m^3 sűrűségű), mint az alábukó, szubdukálódó óceáni lemez (bazalt-gabbro összetételű, 3000 kg/m^3 sűrűségű). Vagy: a régebben felszínközelségben lévő óceáni lemez jobban kihűlt, ezért kicsit ($\sim 1\%$ -kal) nagyobb a sűrűsége, és alábukik a fiatalabb óceáni lemezzel való ütközéskor (de az „ütközés” eleve feltételezi más erők jelenlétét). Ha megnézzük a Csendes-óceánt a szélességi körök mentén, akkor azt látjuk, hogy 5000–10000 km hosszú lemezszakaszon nincs lemezperem, tehát a lemezperem megjelenése is a Föld belsejének felépítésétől függ, amelyről nagyon keveset tudunk.

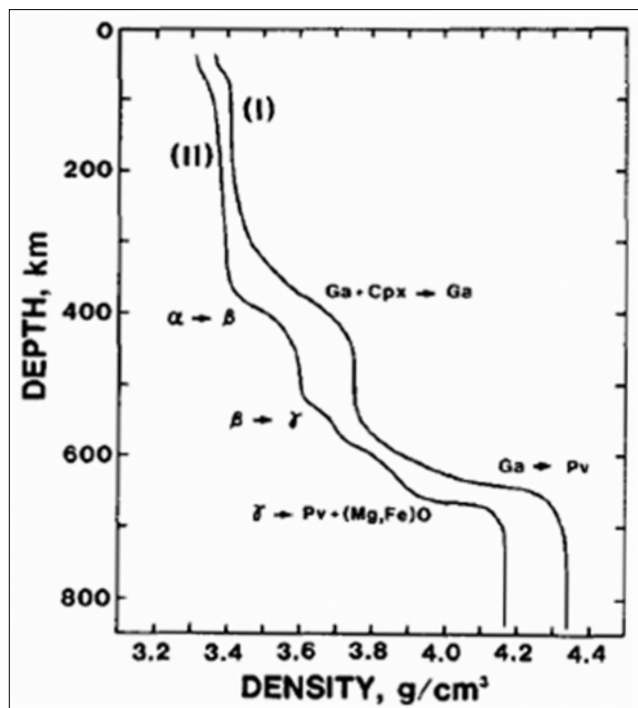
A fenti szám adatok már sejtetik, hogy a sűrűség mozgatta alábukás valamilyen szintig, fennállhat a sűrűségek közötti különbségnek köszönhetően, de emiatt a sűrűségkülönbség miatt egy merev óceáni lemez magától nem fog szubdukálódni, tehát nem ez a sűrűségkülönbség lesz a meghajtóereje a szubdukciónak, legalábbis kezdetben. Gondoljunk csak az idős óceáni lemezdarabokra és a szubdukció hiányára az Atlanti-óceán mentén!

5. A fázisátalakulások hatása

Még egy jelenséget meg kell vizsgálni. Ez pedig az a közetani átalakulásból származó jelenség, amelyet a kémiai és ásványos összetétel megváltozása okoz, pl. az anyag sűrűségében. Ezt a témakört részben érinti tanulmányában Horváth Ferenc is (2006).

A köpeny anyaga peridotit, pontosabban pyrolit, amely 3 rész peridotitból és 1 rész bazaltból áll. A pyrolitos anyag a felszínre emelkedése során olyan egyirányú átalakuláson megy át – bazalttá válik –, amelyek a bazalt köpenybe

süllyedése során visszafelé már nem zajlanak le (visszafordíthatatlan változások). Közvetett bizonyítékaink (pl. a szeizmikus sebességek vagy a felszínre került köpenyzárványok) alapján feltételezhető, hogy más az az anyag, amely kezdetben elindul felfelé és más az, amelyik visszaérkezik a szubdukció során. Ez a fizikai paraméterekre is hatással van.



10. ábra A szubdukálódó bazalt (I) és a környező pyrolit (II) sűrűsége a mélység függvényében (Irifune et al. 1986)

Figure 10 Density of subducting basalt (I) and surrounding pyrolite (II) plotted against depth (Irifune et al. 1986)

A 10. ábra mutatja a szubdukálódó bazalt és pyrolitos környezete sűrűségének a mélységtől való függését (~50–850 km mélységtartományban). Kőzettani szempontból az ábra egy adott mélységtől kezdve magyarázatot ad a szubdukció sűrűségkülönbségből származó meghajtó-, pontosabban húzóerejére. Azaz, ha egy kialakult, érett szubdukcióról van szó, akkor a köpeny mélységében megjelenő 50–100 kg/m³ (1–3%-os) sűrűségkülönbségből származó – a Föld középpontja felé irányuló – tömegvonzási erő, a képlékeny asztenoszféra már lefelé húzhatja a szubdukálódó lemezt. Ringwood (1990) még nagyobbnak adja meg ezt a sűrűségkülönbséget, szerinte ez 150–200 kg/m³ (4–6%) is lehet.

A passzív szeizmikus mérési eredmények is a szubdukálódó lemezek 3–5%-os sebességtöbbletét mutatják a környezethez képest (6. ábra), ami a sűrűség szempontjából is – az analógia miatt – többletet jelez.

Van viszont egy szépséghibája az ábrának: a felső 50–100 km-es tartomány, a teljes litoszféra hiányzik (Ringwood tanulmányában is hiányzik a felső 150 km), ami azt jelezheti, hogy ott valószínűleg más törvényszerűségek, a merev kőzetlemezre jellemző szilárd fázisú tulajdonságok dominálnak.

Ezek ismertetése azonban már túlmutat jelen cikk keretein, és a kőzettani kutatások körébe tartozik.

A meghajtóerő vizsgálata szempontjából a választ ketté kell bontani, mert a merev litoszféalemez valószínűleg másképpen működik, mint a képlékeny asztenoszféra.

Szilárd fázisú tartomány, (litoszféra, ~100 km mélységig)

1. A sűrűség a mélységgel arányosan növekszik, így a kihülésből adódó sűrűsénövekedés sokkal kisebb mértékű, mint a mélysénövekedésből származó sűrűsénövekedés, és nem elegendő ahhoz, hogy az óceáni lemez nagyobb mélységekbe süllyedjen. Ne feledjük, nem egy állandó sűrűségű folyadékba süllyed a lemez! Minél mélyebbre kerül a szubdukálódó lemez, annál sűrűbb anyag veszi körül, amely felfelé nyomja.
2. Az egyre mélyebbre kerülő anyagnak egyre inkább nőni fog (konduktív módon) a hőmérséklete, ezáltal egyre inkább csökkenni fog a sűrűsége is, és egyre inkább elveszti azt a meghajtóerőt (a sűrűségkülönbséget), amely a feltételezés szerint elindította az alábukást.
3. Az alábukó lemez igen csekély része csak az egész óceáni lemeznek, amely nem elég ahhoz, hogy a lemez nagyobbik, még nem alábukó részét maga után vonszolja! A többi lemezrész súrlódási tapadása a környezettel (köpenyanyagokkal) olyan nagy ellenállást jelent, amelyet a kis, lehajló (szubdukálódó) rész hatásával nem lehet leküzdeni.
4. Egy nagy felületű lemez (pl. litoszféalemez) még valamivel nagyobb sűrűsége ellenére is, képes a valamivel kisebb sűrűségű anyagon úszni. Ugyanis, ahogy Daniel Garcia-Castellanos (Ablelwahed 2014) megfogalmazta: ...a lemezek nem „úsznak” az asztenoszféra tetején, hanem „nyugalomban vannak” azon, vertikálisan nem képesek süllyedni, mert az asztenoszférát nem képesek globális méretekben kiszorítani a helyéről.

E négy pont alapján az a nézet, hogy a sűrűségkülönbség mozgatja a szubdukciót, legalábbis a litoszféra szintjén nehezen képzelhető el. Így felmerül a kérdés, hogy akkor mi mozgatja a szubdukciót. Bár az előző részben ezt már elég jól körbejártuk, nézzük meg a fizikai paraméterek mélységfüggését. Ha megvizsgáljuk, milyen törvényszerűségek, folyamatok vannak a Földben, akkor talán választ kaphatunk erre a kérdésre is.

6. Fizikai törvényszerűségek a Föld belsejében

1. A sűrűség a mélységgel arányosan növekszik.
2. A hőmérséklet a mélységgel arányosan növekszik.
3. A nyomás a mélységgel arányosan növekszik.
4. Ha az anyag hőmérséklete csökken, a sűrűség nőni

fog, ha a hőmérséklete nő, akkor a sűrűsége csökken, de csak azonos nyomásviszonyok esetén, azaz az 1., 2. és 3. pont továbbra is igaz.

5. A hideg, rideg (óceáni vagy kontinentális) litoszférában nincs anyagáramlás (konvekciós hőáramlás), csak konduktív hőátadás, mivel a litoszféra merev, tömör anyagként viselkedik.
6. A litoszféra alapvetően szilárd, a legfelső része, a kéreg rideg, kemény. Az alsó kéreg már valamivel képlékenyebb, de alapvetően a köpeny az, ami képes a lassú (földtani időben mért) anyagmozgásra (konvekciós áramlásra).

Elvileg e törvényszerűségek figyelembevételével fel lehet oldani az ellentmondásokat. A folyamatok végiggondolása egy ciklikus folyamathoz vezet, amelynek meghajtóereje a Föld belső hője.

A ciklus (konvekciós áramlás képlékeny anyagban)

Ha a litoszféra alatti mélységben a köpenyanyagnak megnő a hőmérséklete, akkor az tágulni fog (a szükséges hőmennyiség a Föld belsejében rendelkezésre áll). Állandó tömeg esetén ez sűrűségcsökkenést jelent, ami miatt az anyagnak a felszín felé kell elmozdulnia. Egyre hidegebb környezetbe kerül, így a folyamat egészen a felszínig tart (a rendszerben kódolva benne van a fázisátalakulás, azaz az anyagi változás lehetősége is). A feláramló anyag helyére oldalirányból vagy felülről más anyag áramlik be. Ez a függőleges mozgási mechanizmus működik a „hotspot”-ok és az óceáni hát-ságok esetében. A felszín közelében („solidus” határ) az áramlás az alulról jövő állandó utánpótlás miatt vízszintes irányba terelődik, mivel a rideg litoszférában nincs anyagáramlás. Ez alkotja a konvekciós hőáramlást. Az is belátható, hogy a felszálló ágak leszálló párjának is kell lennie, így egyfajta konvekciós körforgás (áramlási rendszer) alakul ki (1. ábra).

A földköpenyben zajló konvekciós áramlásokkal, illetve azok numerikus vizsgálatával Cserepes, Galsa és szerzőtársai, illetve Herein és szerzőtársai foglalkoznak részlete-

sebben (Cserepes 2002, Galsa et al. 2008, Herein et al. 2008).

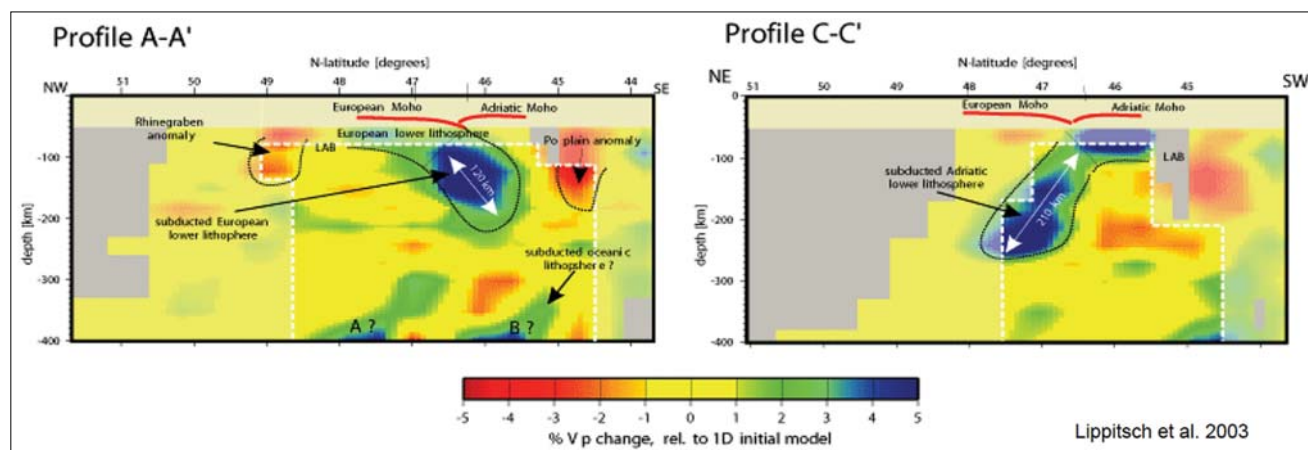
7. Lemezek és a köpenyáramlás

A földkéreg mint szilárd burok körülveszi a Földet. A hőmérséklet által generált konvekciós hőáramlás (anyagáramlás) ezt a szilárd, többnyire összefüggő és éppen ezért nagy tehetetlenséggel rendelkező burkot alulról mozgatja. A nem tökéletes csatolás miatt az anyagáramlás sebességénél egyrészt lassabban teszi ezt, másrészt nem egyforma irányban és nem egyforma sebességgel (ez tulajdonképpen a kontinensvándorlás).

A litoszféra a mozgási energiáját a súrlódásnak köszönhetően veszi át a köpenytől – ezért mozognak a lemezek –, de ennek következtében a mélybeli anyagáramlás és a felszíni lemezmozgás valószínűleg eltérő sebességű lesz. A köpenyáramlás nagy felületen érintkezik a szilárd litoszféralemezekkel, emiatt az összefüggő lemezek igen nagy mozgási energiára és a tömegükből adódóan, igen nagy tehetetlenségi nyomatéokra tesznek szert. Ez az erő mozgathatja az óceáni lemezeket (és ehhez adódik a sűrűségkülönbség hatása), és ez az erő tolja a litoszféra szintjén az alábukó, szilárd és rideg óceáni lemezrészlet a nagyobb mélységek sűrűbb, de képlékenyebb köpenyanyagába, de ez mozgatja a lemezeket is, transzform, konvergens és divergens mozgásokat idézve elő.

Mivel az anyagáramlást csak a köpeny fizikai tulajdonságai teszik lehetővé, így egyrészt a felszíni szilárd kéreglemez a köpenyáramlás alulról koptatja, illetve vékonyítja (beolvaszthat, illetve magával ragadhat részeket) a mozgás során, másrészt a rideg, szubdukálódó lemez mint egy ék hatol be a litoszféra alsó részeibe és a képlékenyebb köpenybe.

A litoszféránál mélyebb részeken az Irifune (1986) vagy Ringwood (1990) által jelzett törvényszerűségek (10. ábra) is életbe lépnek, azaz amikor az alábukó lemez eléri az asztenoszférát, a lemez nagyobb sűrűsége is mozgatóerőként léphet fel.



11. ábra | Szubdukálódó lemezdarabok az Alpok alatt egy ÉNy-DK-i és egy ÉK-DNy-i szelvény mentén (Lippitsch et al. 2003)
Figure 11 | Subducting plates under the Alps along NW-SE and NE-SW sections (Lippitsch et al. 2003)

A szeizmikus tomográfia eredményei az Alpokban 400 km mélységig mutatják a szubdukálódó litoszférolemezeket (11. ábra). Az 5%-os sebességnövekedés azonban csak 80–100 km alatt mutatható ki, efelett csak 1–2% körüli ez az érték, ami talán azt jelzi, hogy a szubdukálódó lemez a köpenyben és a kéregben nem ugyanúgy viselkedik.

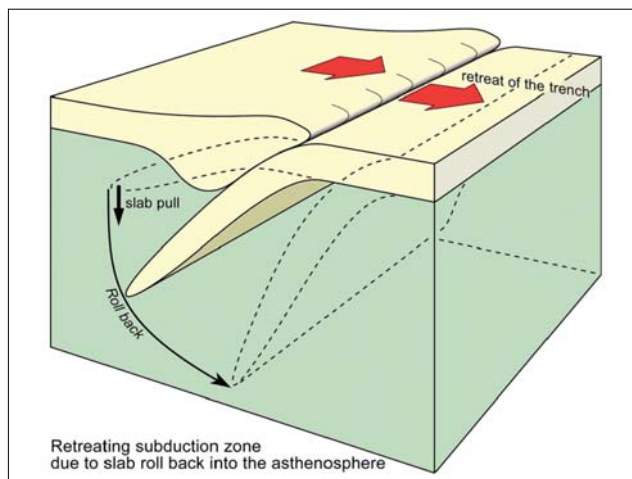
A lemezek eltérő mozgását szinte az egész Földre sikerült meghatározni (7. és 9. ábra), az eredmények azt mutatják, hogy ezek a mozgások a földtani korok során változtak. Változtak irányukban, de változtak jellegükben is, transform mozgásokból konvergens vagy éppen divergens mozgások alakultak ki.

Haladó szubdukció

Normál (vagy haladó) szubdukció (pl. Kamcsatka) esetén az óceáni lemez mozog, illetve szubdukálódik az álló vagy azonos irányban, de lassabban mozgó kontinentális lemez alá. Ebben az esetben a hatalmas óceáni lemez a mozgási energiája révén tolja előre és lefelé magát. Az óceáni lemez csak ott bukik le, ahol a litoszféra eltörött (óceán–óceáni lemezkonverzió), vagy ahol érintkezik egy kisebb sűrűségű, de nagy tömegű rideg kontinentális lemezzel. Ha a szubdukálódó rész vonszolná maga után a lemez többi részét, akkor elvékonyodó óceáni lemeznek kellene lennie, de erről nem tudunk. Ez a szubdukció a szubdukálódó lemez mozgásirányában halad előre, s közben fel- vagy alággyüri, esetleg tolja maga előtt a másik lemezt.

Hátráló szubdukció

Hátráló szubdukció (pl. K-Kárpátok) esetén az óceáni lemez áll (pl. Magura-lemez az eurázsiai lemezhez ragadva) és a mozgó kontinentális lemez (pl. a Pannon-mikrolemez) nyomul rá az óceánra (12. ábra), amely ennek hatására szubdukálódik, miközben szépen lassan hátrál a mozgás irányában (pl. K-Kárpátokban), és a felszíni része a rátolódó litoszférolemez miatt egyre fogy.



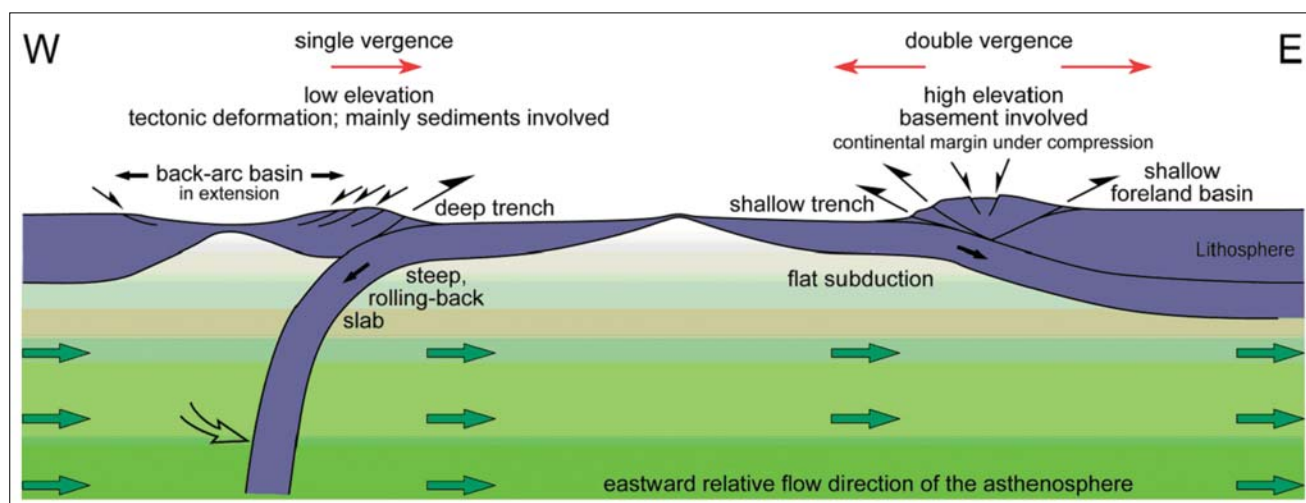
12. ábra Hátráló (rollback) szubdukció (a litoszférolemezek mozgása tükrözi a köpenyáramlás irányát is)

Figure 12 Rollback subduction, the direction of plate motions indicates the direction of mantle convection

Ebben az esetben – mivel az alábukó óceáni lemezrész már nagyobb lehet, mint a még nem szubdukálódó rész – valóban érvényesülhet az alábukó rész húzóereje is. A Kárpát-medence esetében a Pannon-mikrolemezre ez az erő alig fog hatni, ha figyelembe vesszük, hogy éppen a Pannon-mikrolemez mozgása okozza a szubdukciót (Magura bezáródását) és a kollíziót (Kárpátok mentén). Vagyis itt az extenziót egyértelműen valami más hatásnak kell tulajdonítanunk. Úgy gondoljuk, hogy mivel itt ütközés van, ezért a folyamatosan jelen lévő köpenyáramlás egyre kevésbé képes mozgatni a Pannon-mikrolemezt a stabil eurázsiai lemez felé (ezt GPS-vizsgálatok ki is mutatták), ebből adódóan a gyorsabb köpenyáramlás alulról koptatja a kérget folyamatosan vékonyítja azt, ahogyan ezt Szénás György már 1964-ben felvetette.

A szubdukció szöge

A konvergáló lemezek egymáshoz viszonyított mozgása, illetve a köpenyáramlás iránya dönti el azt, hogy a szubduká-



13. ábra A hátraforduló (rollback) és a lapos (flat) szubdukció (Doglioni et al. 1999)
Figure 13 Rollback and flat subductions (Doglioni et al. 1999)

lódó lemez milyen szögben bukik alá. Azonos nagyságú erők esetén a 45°-os szögű szubdukció valószínű. Ez a szög kisebb, ha a szubdukálódó lemez (és a köpenyáramlás) gyorsabban mozog. Ennek egyik szélsőértéke akkor jelentkezik, amikor az álló lemez alá szubdukálódik az óceáni lemez (flat subduction). Ilyenkor egy második, közel vízszintes bazaltos kéreg alakulhat ki az alátolódás miatt (13. ábra jobb oldala). Ezt a szubdukciót nagyon nehezen lehetne megmagyarázni a csak a sűrűségdifferenciából származó mozgással!

Ha a nem szubdukálódó lemez a gyorsabb, akkor a szubdukciós szög egyre nagyobb, amelynek a szélső értéke akkor jelentkezik, amikor az álló szubdukálódó lemez alábukó részét a másik mozgó lemez és köpenyáramlás visszagörbíti a szubdukálódó lemez irányába (rollback subduction, 13. ábra bal oldala).

Látható, hogy minden esetben a lemezek konvergens mozgása (szemtől szembe történő vagy utolérési ütközés) határozza meg a szubdukció jellegét, annak szögét, megjelenési formáját. A konvergens mozgás pedig a konvekciós köpenyáramlásokra vezethető vissza!

8. Következtetés

Az óceáni kéreg és annak kihűlésből származó sűrűsagnévedése a felszínről közelítve a legmegfoghatóbb a szubdukció jelenségében. De ez nem az egyetlen erő, amely egy alábukó litoszféalemezre hat. A közeg visszatartó ereje, a litoszféalemez tehetetlenségi nyomatéka és az asztenoszféra konvekciós áramlása, majd a köpeny szintjénél mélyebben jelentkező sűrűségdifferencia egyaránt hatással van a szubdukálódó lemezre, és ezek eredője dönti el annak mozgását.

Heuret és Lallemand (2005) így fogalmazza meg cikkük végén a következtetésüket: „We already know from this study that their effect is larger than those generated from the bending moment of the slab pull.”^{c)}

Visszatérve tehát az első magyarázathoz, a kihűlt óceáni lemez a sűrűségkülönbségből adódóan túl sokáig nem süllyedne, ezért nem is húzhat túl sokat. Az óceáni lemez szubdukálódásáért és valószínűleg a kéreg kivékonyodásért is a köpenyáramlás lehet a felelős, amely folyamatosan hat, és próbálja mozgatni a rendkívül nagy tehetetlenségi nyomatékkal rendelkező lemezt, vagy ha mozgatni nem tudja, akkor alulról koptatja, vékonyítja azt.

Csak a passzív szeizmikus mérések alapján találunk olyan érett szubdukciókat, ahol több 100 km mélyre süllyedt lemez mutatható ki, s ahol a lesüllyedt lemez köpenybeli sűrűsagnévedése a lemez tömege miatt már domináns húzóerőként léphet fel.

A tanulmány szerzői

Kiss János, Bodoky Tamás

Jegyzetek

^{a)} „Az asztenoszféra szerepét ebben a változatban alapvetően passzívnak tekintettük.”

^{b)} „...köpenyáramlások által létrehozott nyomóerő...”

^{c)} Mi már tudjuk ebből a tanulmányból, hogy ez utóbbiak (a köpenyáramlások) hatása nagyobb, mint az alábukó lemez nyomóerőéből (a sűrűségdifferenciából) származó meghajtóerő.

Hivatkozások

- Abdelwahed M. F. (2014): How can a subduction slab sink in the asthenosphere, however, it is normally floating on it? ResearchGate: https://www.researchgate.net/post/How_can_a_subduction_slab_sink_in_the_asthenosphere_however_it_is_normally_floating_on_it2
- Burg J. P. (2011): Tectonics. ETH Zürich, University Notes
- Cserepes L. (2002): Convective motions in the mantle. Acta. Geod. Geoph. Hung. 37/1, 3–27
- Csontos L. (1998): Lemeztektonika másként. Természet Világa II. különszám, 1017–1024
- Dobretsov N. L., Koulakov I. Yu., Litasov Yu. D. (2012): Migration paths of magma and fluids and lava compositions in Kamchatka. Russian Geology and Geophysics 53, 1253–1275
- Dogliani C., Harabaglia P., Merlini S., Mongelli F., Peccerillo A., Piromallo C. (1999): Orogens and slabs vs. their direction of subductions. Earth Science Reviews 45/3–4, 167–208
- Forsyth D. W., Uyeda S. (1975): On the relative importance of the driving force of plate motion. Geophysic. J. R. Astr. Soc. 43, 163–200
- Galsa A., Lenkey L., Süle B., Herein M. (2008): A földköpenyben zajló konvekcióról. Magyar Geofizika 49/2, 75–87
- Herein M., Galsa A., Lenkey L., Süle B. (2008): Termikus földköpeny-konvekció kétdimenziós numerikus modellezése különböző geometriák esetén. Magyar Geofizika 49/3, 111–123
- Heuret A., Lallemand S. (2005): Plate motions, slab dynamics and back-arc deformation. Physics of the Earth and Planetary Interiors 149, 31–51
- Horváth F. (2008): Lemeztektonika és az új globális geodinamika. Magyar Tudomány 2006/8, Planetológia, 930–945
- Irfune T., Sekine T., Rindwood A. E., Hiberson W. O. (1986): The eclogite-garnetite transformation at high pressure and some geophysical implications. Earth and Planetary Science Letters 5/77 245–256
- Kearey P., Vine F. J. (1990): Global Tectonics, Blackwell Scientific Publications, Oxford, p. 302
- Lippitsch R., Kissling E., Ansorge J. (2003): Upper mantle structure beneath the Alpine orogen from high-resolution teleseismic tomography. Journal of Geophysical Research 108/B8, 2376. DOI: 10.1029/2002JB002016, ISSN: 0148-0227
- Minster J. B., Jordan T. H. (1978): Present day plate motions, Journal of Geophysical Research 83, 5331–5351
- Muller R. D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W. R. (2008): Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 9, Q04006, doi: 10.1029/2007GC001743
- Ringwood A. E. (1990): Slab–mantle interactions; 3. Petrogenesis of intraplate magmas and structure of the upper mantle. Chemical Geology 82, 187–207
- Szénás Gy. (1964): Néhány megjegyzés a magyarországi földkéregről. Geofizikai Közlemények 13/3, 301–303
- Thatcher W., Pollitz F. F. (2008): Temporal evolution of continental lithospheric strength in actively deforming regions. GSA Today 18(4/5), 4–11, doi: 10.1130/GSAT01804-5A.1
- Zahirovic S., Müller R. D., Seton M., Flament N. (2015): Tectonic speed limits from plate kinematic reconstructions. Earth and Planetary Science Letters 418, 40–52

Eötvös Loránd, a reneszánsz lelkületű tudós

SZABÓ Z.

Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (MFGI), 1143 Budapest, Stefánia út 14.

E-mail: szabo.zoltan@mfgi.hu

Beérkezett: 2016. január 6.; *elfogadva:* 2016. január 6.

Eötvös Lorándról szólva elsőként óhatatlanul világhírű ingája jut eszünkbe. Nem véletlenül, mert ingájának megalkotása vezetett oda, hogy a geofizikusok úgy emlékeznek rá, mint a kőolajkutató geofizika atyjára, a geodéták a földalak-kal kapcsolatos vizsgálataiért, a fizikusok pedig a tehetetlen és a súlyos tömeg azonosságának nagy pontosságú kimutató-
tásáért tisztelik.

A megemlékezésekben kevesebb szó szokott elhangzani emberi tulajdonságairól, pedig sokoldalú és színes egyéniség volt. Ifjú korában verseket írt, naplót vezetett, melyet feltűnően jól sikerült rajzokkal illusztrált. Igazi otthona azonban a laboratórium volt. Amikor becsukódott mögötte a laboratórium ajtaja, megszűnt számára a külvilág. Nem törődve az élet zajával és eseményeivel, minden gondolatát csakis a megoldandó feladat kötötte le. Keresve-kutatva a probléma megoldásának lehetőségeit, képes volt éjt nappallá téve heteken, sőt hónapokon át szakadatlanul dolgozni, amíg eljutott a megoldáshoz. Csak ritkán lépett a nyilvánosság elé, tudományos dolgozatai tömörek, az olvasó sokszor

nem is sejt, hogy egy-egy mondatában hosszú hetek, hónapok munkája rejlik.

Az intenzív munka mellett azonban mindig talált időt és módot szellemi kikapcsolódásra és sportolásra. Rendszeresen lovagolt, pestszentlőrinci nyaralójából lóháton járt be egyetemi előadásait megtartani. Nyaranta kerékpározott és sziklamászó szenvedélyének hódolt. Eötvös a tanév végén azonnal vonatra ült és sietett kedvenc nyaralóhelyére, a déltiroli Schluderbachba, hogy kipihenje a tanév fáradalmait és erőt gyűjtsön a következő év munkájához. Szerette a hatalmas hegyeket, az égbe nyúló sziklaóriásokat. Kerékpártúrái során túlnyomórészt Budapest környékét kereste fel, szinte napi rendszerességgel kerékpározott ki Téténybe és vissza, de külföldi nyaralásai idején sem hanyagolta a kerékpározást.

A külső elismeréseket soha nem kereste, ennek ellenére élete során számos hazai és külföldi elismerésben volt része. Az akadémiai elnökség és a rövid miniszterség mellett számos tudományos és társadalmi szervezet vezetője vagy vezetőségi tagja volt. Ezek pusztá felsorolása is meghaladná a cikk kereteit, ezért a továbbiakban hegymászó és fotográfusi tevékenységére szorítkozunk. Ötvenes éveit elhagyva igyekezett megszabadulni társadalmi megbízásaitól. 1905-ben akadémiai elnökségéről lemondó levelében a következőket írja: „Múlnak az évek s bár munkaerőmet lankadni még nem érzem, mégis minden lenyugvó nap arra int, hogy a Mindenhatótól nekem kiszabott munkaidő előbb-utóbb végére jár. Addig, a míg erőm tart, addig a míg erőm van munkára, első, mert csak általam teljesíthető feladatommak kell tartanom azt, hogy kiegészítsem és feldolgozzam azt a tudományos anyagot, melyet évtizedek alatt nagy fáradtsággal és részben éppen Akadémiánk támogatásával összehordtam. A meddig élek, ennek kell, hogy éljek. Mielőtt késő volna, erre kell összegyűjtenem erőmet, megválva azon állásaimtól, melyek annak további szétforgácsolását okoznák.”

De térjünk vissza a kezdetekhez. Kérdés, hogyan és miért alakult ki a fiatal Eötvösben a természet és ezen belül különösen a hegyek iránti vonzalom. Ennek okát egyrészt gyermekkorának nyaraiban kereshetjük, melyeket a természet ölében, a család svábhegyi villájában töltött. Abban az időben a Sváb-hegy még a fővárostól távoli, vadregényes hely volt. Másrészt neveltetésében, szülei ugyanis jó érzékkel fogadtak kiváló házitánítókat egyetlen fiúgyermekük mellé. Egyi-



Eötvös lovát ugratja a nemzeti lovarda udvarán

kük a Lorándnál mindössze 9 évvel idősebb Krenner József Sándor, a későbbi neves geológus-mineralógus, egyetemi tanár, akadémikus, aki természettudományi tárgyakra oktatta, majd ifjúkori kirándulásainak, túráinak állandó társa lett. Másikuk az akkor még joghallgató, későbbi neves festő és műkritikus, majd a rajztanárképző igazgatója, Kelety Gusztáv, aki a humán tárgyakra oktatta. A gyermek Lorándot ábrázoló festmények mellett neki köszönhetjük az ifjú kiemelkedő rajzkészségének pallérozását is. Mindkét tanítója rajjongója volt a természetnek, ami nyilvánvalóan döntő hatással volt fiatal növendékükre.

Valószínű azonban az is, hogy az anyai ági gének is szerepet játszhattak. Anyai nagybátyja ugyanis az 1830-ban született Rosti Pál, aki katonaként részt vett az 1848–49-es szabadságharcban, majd a világosi fegyverletétel után sógora, Trefort Ágoston segítségével Münchenbe utazott, ahol beiratkozott a müncheni egyetem természettudományi karára vegytant tanulni. Egyetemi tanulmányait kisebb megszakításokkal 4 év alatt fejezi be. Hazatérve a pesti egyetemen folytat egy évi földrajzi és néprajzi tanulmányokat. 1854 végén Párizsba utazik, hogy fotográfiai ismereteket szerezzen. Közben 1855-ben fél év alatt körbeutazza Angliát. 1856 augusztusában az Egyesült Államokba utazott, meglátogatta a Niagara-vízesést. 1857 januárjában Havannába, majd Venezuelába ment, innen Mexikóba, ahol megmászta a Popocatepetl 5452 m magas csúcsát, és egy éjszakát is eltöltött a vulkán 1500 m átmérőjű kráterében. Két évi utazgatás után tért haza Magyarországra. Utazási élményeiről saját fényképeinek felhasználásával négy albumot állított össze, ezekből egy példányt Alexander Humboldtnak, egy másikat a Magyar Nemzeti Múzeumnak, egyet pedig nővérének, Rosty Ágnesnek, Loránd édesanyjának ajándékozott. Az album később *Úti emlékezetek Amerikából* címmel 1861-ben nyomtatásban is megjelent. Rosti e művének köszönhető, hogy a Tudományos Akadémia levelező tagjának választotta őt, és hogy geográfus, néprajztudós és fotográfusként vult be a magyar tudománytörténetbe.

Az akkor 13-éves Loránd bizonyára élvezettel forgatta a remek képekkel illusztrált kiváló útleírást, ami nagy hatással lehetett rá. Ezt a feltevést látszik alátámasztani abban az időszakban született két versikéje, melyek ugyan nem tartoznak a magyar líra gyöngyszemei közé, de figyelmünkre érdemesek. Részletek a versekből:

Mi szép e táj e völgynek mély ölében!
 Mi kék e tó! mi csillogó a hab!
 Rajt' megtörik szivárványnak színében,
 Az égből csillogón lenéző nap!
 A tó fölött egy jégfödte hegy van
 Sziklák földik hatalmas homlokát!
 Lenéz, s a csendes tükörsima tóban
 Megnézi arcán csillogó havát...
 Más oldalról sziklafal keríti,
 Mint kő medencét, a szép tó vizét,
 S egy vízesésnek egyhangú beszédi,
 Kíséri madárcák énekét!

— —

Babér után lihegve indulánk
 Én és a csattogány a csúcs felé
 S míg én küszködtem a hegy oldalán
 Ő fölrepült s jutalmát megnyeré
 Mit én nem érek el talán soha
 Ő ahhoz eljutott egy perc alatt,
 Oh ég! Ne légy irántam mostoha,
 Adj! Kérlek! Adj nekem is szárnyakat.

A hazai túrák után a fiatal Eötvös első önálló külföldi, konkrétan svájci, útjára 1866-ban, 18 éves korában került sor. Elutazása után apja – ismervén fia kalandra éhes természetét – naplójában imigyen aggodalmaskodik: „Nagy aggodalmakon mentem keresztül. Fiam utolsó levelében megírta újabb utazási tervét s hogy Zermattba megy. Tudtam, hogy a Matterhorn a Monte Rosa mellett fekvő azoknak találkozási helye, kik ezen hegyek egyikére, vagy más veszélyesebb vállalatokra készülnek és ismervén fiamat, előre látám, hogy ha egyszer ott van, nem fog ellent állni a kísértésnek, hogy ő is erejét ily merényleten próbálja. Ehhez jött, hogy éppen most 13 napig tőle levél nem érkezett, mi annál feltűnőbb volt, mert eddig minden harmadik napon írt.”

Egy pár nappal későbbi bejegyzésében pedig ezeket írja: „Helyesen ítélt meg fiamat. Ő csakugyan Zermattból felment a Monte Rosára s főképp mert az évszak nem ily excursiókra való, főképp miután egy nappal előtte erősen havazott, és a mászás napján erős szél volt, nagy veszélynek tette ki magát. De ámbár ez által tudva akaratom ellen cselekedett, örülök, hogy tette. Jele, hogy a fiamban bátorság van s akarat, szilárdság még azok irányában is, kiket leginkább szeret.”

Loránd saját beszámolója szerint, apja aggodalma nem volt alaptalan: „... szeptember 12-én a Monte Rosára másztunk fel. Az idő teljesen tiszta volt; de a hófuvatagok a csúcson oly erősek, hogy néhány lábbal alatta egy szikla mögé bújva kellett a kilátásban gyönyörködni. A partie nem számítható a legszerencsésebbek közé, mert nem említve egy erős térdütést, melyet egy szakadékba esve szenvedtem; három vezető közül egyik arcbőrét és kalapját veszítette, a másik kettő kezét fagyasztotta el. Útitársam pedig minden további útra képtelen; lábai szín s alakra nézve az elefántéihez, fülei pedig a szamáréhoz hasonlítanak. Szegény nagyokat nyög s a legrövidebb úton hazakészül.” Az utitárs kénytelen volt lóháton visszatérni Zermattba. A kalandos hegyi túra azonban nem tántorítja el a további hegymászásoktól.

1868-ban Krenner József társaságában az Erdélyi-sziget-hegységben túrázik. Felkeresik a Bihar-hegység legérdekesebb látnivalóját, a néhány évvel korábban felfedezett Szkerisórai- (magyarul: Aranyosfői-) jégbarlangot. A nem mindennapi képződmény olyannyira megragadja a mindössze 20 éves egyetemi hallgató fantáziáját, hogy a *Vasárnapi Újság* 1869. január 5-i számában „A Scarisórai jégbarlang” címmel beszámol élményeiről. Részletesen ismerteti a hely földtani adottságait és a jégbarlang keletkezésének fizikai körülményeit. Keresi a földtani és fizikai jelenségek közötti ok-okozati összefüggéseket. Az 1165 m magasságban elhelyezkedő 105 m mély barlang nyári hőmérséklete



A Grossglockner

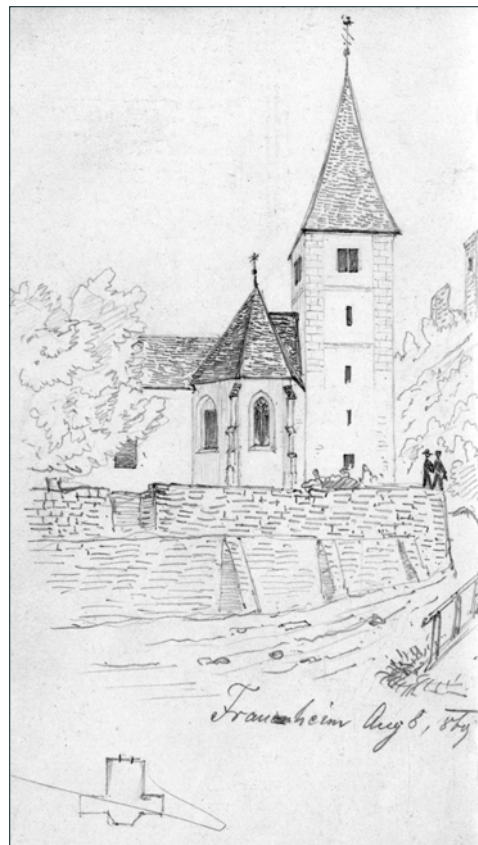
sem haladja meg a +1 C fokot, a 26 m vastagságú jég réteg megmaradását a barlangban uralkodó állandó huzat biztosítja. Apja nagy meglepéssel fogadja fia első tanulmányának megjelenését: „Ily kisebb dolgozatoknak nemcsak azon haszna van, hogy velők foglalkozva, tárgyunkat alaposabban tanulmányozzuk, hanem azon haszna is, hogy az előadásban gyakoroljuk magunkat, mi arra nézve, ki a tudományban hatni akar, nem kis fontosságú. Meg vagyok győződve, hogy sok ember, ki később minden egyéb képességgel bír, hogy magának tudományos nevet szerezzen, ezt csak azért nem is kísérli meg, mert az előadás nehézségeivel megküzdeni nem tud. – Nálunk Magyarországon ehhez még az járul, hogy nemcsak azáltal, hogy a tudományt előbbre visszük, hanem azáltal is, ha azt terjesztjük, nagy érdemet szerzünk magunknak.”

1869 augusztusában már ismét az Alpokban találjuk, megmászta a Grossglocknert és a Grossvenedigert. Kirándulásairól rajzokkal illusztrált naplót vezetett, melyek közül kettőt bemutatunk.

1867-től fizikát, kémiát és matematikát hallgat a heidelbergi egyetemen. Sűrű levelezésben áll apjával, melyből sugárzik a bensőséges kapcsolat és kölcsönös tisztelet egymás iránt. „Én ez évben értem el legforróbb vágyamat; itt vagyok Heidelbergben a legszebb vidék közepén s mert az elmúlt három hónapon át (nyugodtan mondhatom) tanultam megelégedetten – sétáimon vagy ha este a várudvarba megyek oly élvezet ragad el, melynél edesebb még az álom vagy az emlék sem lehet. És ez évben te is elérted célodat, a miért egész életemben fáradtál a nemzetnek alkotmányt szerezni, s így azon állapotba helyezni melyben a haladásra képes lesz, annak teljesülése az 1867-iki év eseményei közé tartozik.” – írja 1867 decemberében apjának.

Tanulmányaiban szépen halad, de nem veti meg a diákélet vidámabb oldalát sem: „Sört ma ittam Heidelbergben először, a „Fauler Pelz”-ben voltam, többre két pohárnál azonban nem vittem, szomszédjaim magasztos példájának daczára; különben a lumpoló német nagyon tisztességes valami s minden előleges ellenszenvem daczára kezdem a Burschokat tisztelni – a legudvariasabb emberek az egyetemen.” – írja egy másik levelében.

Kedvenc professzora, Gustav Kirchhoff tanácsára az 1869-es tavaszi félévet a königsbergi egyetemen tölti, ahol



Frauenheim

elsősorban Franz Neumann elméleti fizikából tartott előadásaira koncentrált. Tanulmányai azonban sokkal több matematikai ismeret meglétét feltételezték, mint amellyel Heidelbergben megismerkedett, ezért nem érzi jól magát. 1869. május 21-i apjához írt levelében a következőket írja: „Nem tudok itt megnyugodni. Napról-napra kedvetlenebb leszek és inkább vágyódom hazatérni. Az előadásokban élvezetet nem találok és haladni nem tudok, én azt képzelem, hogy énreám nézve a leghasznosabb volna innét mentől előbb elutazni.” Ehhez apai tanácsot és beleegyezést kér. Apja válaszlevelében megértéséről biztosítja, de azt tanácsolja, hogy a félév végéig maradjon.

Ilyen lelkiállapotban értesül arról, hogy August Petermann német geográfus expedíciót tervez a Spitzbergákra, és ehhez támogatókat és munkatársakat keres. Kapóra jön a lehetőség, és a kalandra mindig kész ifjú csatlakozni szeretne az expedícióhoz. A részvétel előfeltétele az utazási költségekhez 1000 tallérral való hozzájárulás. Apját váratlanul éri az ötlet, ezt követő, alább idézett leveleiből kiderül, hogy szakmai szempontból nem találja lényegesnek fiának az expedícióban való részvételét, és azon aggódik, hogy az utazás miatt tanulmányai halasztást szenvednének. Az elutasítás legfőbb indoka azonban a család nehéz anyagi helyzete volt, mint az apja alábbi levélrészletekből kiderül: „...Ismered vagyoni állásunkat, mely kizárólag anyád birtokának jövedelmeiből és abból áll, mit munkámmal szerzek, s így nem szükséges mondanom, hogy éveken át, azaz mióta felnőttek s a leányok világba jönnek, úgyszólván mindig szorult állapotban vagyok. Évek óta csaknem mindig oly helyzet-

ben vagyok, hogy költségeim jövedelmeimet felülmúlják, s habár személyes hitelem és a legnagyobb pontosság által elérem, hogy mindamellett tönkre nem megyünk, kétségtelen, hogy évről évre, bár csak kevéssel, szegényebbek leszünk, mi reám nézve szomorító s aggodalmas, de nektek, kik előtt még az egész élet áll, bizonyosan még károsabb, s azt teszi kötelességünk, hogy minden felesleges költséget kerüljünk. ...

Miután arra, hogy ezen expedíció a magyar kormány által segítessék, még azon esetben sem lehetne kilátás, ha te a tudományban már állást vívtál volna ki magadnak, s így mint az ország által erre kijelölt tudós indulnál útnak, a költségek egyedül reád esnének, s én ezek elviselésére képes nem vagyok. S ez egyik oldala a kérdésnek. – A másik az, hogy más tudományokkal foglalkozva eddig, az expedícióban csak mellékes szerepet játszhatnál, mi annyi időnek, fáradságnak s pénznek árán nagyon is drágán lenne vásárolva.”

Egy későbbi levelében az alábbiak szerint részletezi jövedelmi helyzetüket: „Ismered anyád vagyonát, mely összes vagyonunkat képezi, s a terhek levonása után körülbelül 12000 frtot jövedelmez. Ebből múlt évben reád valamivel többet költöttem 3000 frtnál. Most számítsd ehhez háztartásom s a 3 leány költségeit, s látni fogod, hogy nagyobb adósságoktól csak azáltal menthetem meg magamat, mert mint miniszter 12000 frt fizetést kapok, mely azonban alkotmányos országban mindig bizonytalan, s az országgyűlés egy szavazatától függ, mely valamely fontosabb kérdésben kisebbségben hagyván, lemondásra kényszerít.”

Lorándot váratlanul érik apja aggályai sarkvidéki útiterveit illetően, hiszen ő már felvette a kapcsolatot Petermannal. Kínos helyzetben érezve magát, apjához fordul segítségért, mellékelve a Petermann-tól kapott levelet:

Kedves atyám!

Heidelberg Dec. 21, 869

Visszatérek a sarkvidéki expedíció kérdésére. – Tudod hogy egy ilyenmő utazás mindig fő vágyaim közé tartozott, s így most miután Petermann-tól levelet kaptam, vágyam hevesebben éledt föl mint valaha. E tervem kivitele most csaknem beleegyezésedtől függ s talán megnyerem azt, ha az ügy állásával megismertettek. – A kis expedíció, melyről itt szó van, magány vállalat melyet Petermann segítségével Dr Bessels hoz létre. A hajó, az 1868iki német expedíció hajója „Grönland” e vállalatnak szabad rendelkezésére áll, egyéb költségeit részben Robbenschlag által, részben különösen e célra gyűjtött pénzekből fogja fedezni. Maga Dr Bessels 1000 tallért ad e célra, s ugyan annyit kellene részvételében nekem is adni.

Dr Besselen kívül ki zoologus, egy physikus, s ha akad egy geologus alkotná az expedíció tudományos részét. Ehhez járulna egy hajós kapitány s a hajónak szokott személyzete. A cél, melyet az expedíció magának kitűzött keleti Spitzbergen földrajzi felvétele s a szomszéd eddig el nem ért „Gillis Land” felkeresése. E célból Martius végén indulna ki Bremerhavenből s vagy Norvégia partjának mentében, vagy Jan Mayennak tartva haladna rendeltetése felé s

legkésőbb Octoberben térne vissza. Telelésről s így veszélyről szó sincs ép úgy mint nincs szó a sark kereséséről.

Fel vagyok szólítva mint physicus részt venni ez expedícióban s én forró vággyal kívánom azt. 1000 tallér nem kis pénz, de nem elég nagy, hogy akadály legyen ott, hol ily kedvező alkalom nyílik arra, hogy végre már tegyek valamit. Nem tekinthetem azt sem akadállynak, hogy ez utazás jelenlegi tanulmányaimból kisodorna, s így bizonyos értelemben egy évet veszítenék. Mit veszíthetek?, azt hogy egy évvel később nevezhetem magamat Doctornak, de nyerem ennek ellenében azt, hogy tanulóból egyszerre actív tudós leszek. Mint már múlt levelemben említettem úgy most is csak egy akadályt láthatnék és ez aggodalmatok. De miután a tervet közöltem veled, s láthatod, hogy inkább veszélytelen utazás, mint hosszadalmas sarki expedícióról van szó, talán aggodalmaid is oszlani fognak.

Ily közel egy ábrándom valósulásához, s az alkalomhoz tevékenységem által magamnak érdemeket szerezni, forróan kérem beleegyezésedet. – Ha valósulna e tervem úgy mindjárt előtanulmányokra vetném magamat, s e célból valószínűleg Göttingenbe mennék, egy két hónap alatt tudnám mindazt, mire feladatom teljesítésére szükségem lenne. – Levelém talán karácsony estjére érkezik hozzád, s reményilem nem fogja zavarni annak nyugalma, Sok örömet kíván ez estére

szerető fiad

Loránd

P.S. Itt küldöm P. levelét s megjegyzem, hogy hiedelme, mintha én magamat már elköteleztem volna, csak félreértésen alapulhat, mert én eddig határozott választ nem adtam, s lekötve semmi tekintetben nem vagyok. Kérlek tedd el, vagy küldd nekem vissza e levelet.

Apja válasza hamarosan megérkezik:

Kedves fiam!

25/12 869.

Idemellékelve küldöm Petermann levelét, melyet hozzá zárt soraiddal éppen az ünnepekre – mint valószínűleg magad is gyanítád, nem nagy megnyugtatósomra – kaptam. Nem akarok késni válaszómmal.

1-ször: Mert, mint Petermann leveléből látom, ő azt hiszi, hogy magadat lekötöztetted, s ha ezen nézete, mint irod, téves, mentül előbb fel kell világosítani őt, és ha nem, meg kell írni, hogy családi viszonyaid nem engedvén az utazást, nem mehetsz; hogy azon esetre, ha kármentesítést kíván (Reugeld), az összeg iránt vele mentül előbb tisztába jöhess, s azt lefizess.

2-ször: Azért, mert hozzám intézett kívánságodat illetőleg egy percig sem lehetek kétségben. Absztrahálok az aggodalomtól, melyet ily utazásod nekem s főképp anyádnak okozna. Ez magában véve nem ok, s ha ma egy valóban érdemes feladat, oly valami, mi által valóban nevet szerzesz magadnak, kerülne elé, nem tartóztatnád vissza. Még a költséget sem említettem – ámbár a nyíltság után, mellyel finánciális helyzetemet veled közöltem, beláthatod, mennyi megerőlte-

tésembe kerül, hogy csak szükséges kiadásaimat is fedezhessem; de vajon a Spitzbergen partjai egy részének mappolása, melyet bevégezvén, neved Petermann egy földabroszának szegletén megjelenik, vagy Gillis-Land keresése, melyet közepszerű német hajón, német kapitánnyal minden valószínűség szerint megtalálni nem fognak, érdemes-e arra, hogy tanulmányaidat félbeszakaszd, s az irányt, melyet követtél, ismét megváltoztasd? – Éppen nem állítom, hogy a doktorátusnak elnyerése valami nagy, dicső feladat, de végre természetes bevégezése akadémiai pályának, s oly valami, mit magadban feltevé, s mire magadat ígéreted által köteleztél, s egy kétségtelen s ez az: hogy ha mindig csak kezdünk, s azt, amit kezdtünk, akár kicsi, akár nagy legyen, elhagyjuk, mielőtt bevégeztük, egész életünket eredmény nélkül vesztegetjük el. ...

Loránd válasza nem késlekedik:

Kedves Atyám!

Heidelberg, Dec. 28, 1869.

Kérésemet kereken megtagadod, s én engedelmeskedem, mert másként nem tehetek, a nélkül, hogy érveid meggyőzőnének. Ha közelebbről tekinted a dolgot, látni fogod, hogy sem az nem áll, hogy az utazás feladata fáradságra nem érdemes; sem az, hogy én ez utazás tervezése által célomtól eltértem.

E leveledben, úgy mint már azelőtt is többször, a hibát veted szememre, hogy feltételeimben ingatag vagyok; ezt jogosan tagadhatom.

Az első percztől kezdve mióta higgadtan határozhattam jövőm felett a tudományos pályát választottam, s nem tudok egy napot sem, melyen e cél szemeim elől vesztettem volna. biztonsággal állíthatom azt is, hogy az időtől kezdve, midőn pályám követésére alkalmam nyílt, fáradtam is érte. Ha néha gyengének és habozónak láttál, az mindig csak

veled szemben történt; midőn te mint atya szeretettel törekedtél feltételeimtől eltéríteni. Hogy ily fegyverek hatással voltak reám azt nemcsak jellemhibának nem, de sőt helyesnek tartom.

Látom, hogy véleményedet jellemem felett másként meg nem változtathatom, mint ha ellenedben is határozottan lépek föl.

Ezt teszem, s kinyilatkoztatom: hogy most is, úgy mint már 4 év előtt volt, feltétem, tudományos pályát követni, s minden erőmmel törekedni fogok hazámban, vagy ha ott akadályokat gördítesz elélem Németországban mint tanár működni. E céltól eddigelé nem tértem el, s tőle eltérve egyéniséget kellene megtagadnom; de ha egy feléje vezető úton elindulva, egyszerre sokkal rövidebb és kedvezőbbre bukkanok, úgy minden esetben meg fogom kísértetni arra által térni.

Ily eset fordult elő midőn a sarki utazásra alkalmam nyílt. Nem tartom helyesnek ha a fiú atyjával ellenkezésben ily határozottan lép föl; mégis teljesen igazolva érzem magamat, ha meggondolom, hogy önbecsülésem és a te becsülésed megnyerése kényszerítettek. Hiszem, hogy ez indokokat tekintetbe véve, nem fogsz neheztelni szerető fiad

Lorándra

A Spitzbergákra tervezett utazás tehát elmaradt. Loránd befejezi egyetemi tanulmányait, ledoktorál, és 1870-ben hazatér Magyarországra. A következő évben a pesti egyetem a heidelbergi doktori disszertációja alapján magántanárrá habilitálja. 1872-ben az elméleti fizika rendes tanárává nevezik ki. 1875-től a kísérleti fizikai tanszék vezetője. 1876-ban megnősül, felesége Horváth Boldizsár igazságügyi miniszter leánya, Gizella. 1873-ban az akadémia levelező tagja stb., stb. Tehát mondhatni, üstökösként halad tudományos pályafutása.



Schludersbach, Albero Ploner, háttérben a Croda Rossa

A pályakezdés és családalapítás kezdeti évei után talált rá a már említett Schludersbachra, a Dolomitok közepén elhelyezkedő településre, azon belül a családias hangulatú Ploner-féle vendégfogadóra, ahová ettől kezdve egészen 1914 nyaráig évente visszatért, s itt pihente ki az egyetemi tanév és az intenzív kutatómunka fáradalmait.

Az alpinizmus évkönyvei szerint első sikeres túrájára 1877 júliusában került sor, amikor az Innerkofler hegyi vezető fivérek társaságában első amatőr hegymászóként megmászta a Zwölferkofel – napjainkban Croda dei Toninak nevezett – legmagasabb csúcsát (3094 m). Különösen sokat túrázott 1877–1888 között, legkedveltebb hegyi vezetője, Michael Innerkofler társaságában. 1888. augusztus 20-án azonban Innerkofler, akit később a Dolomitok királyának is neveztek, szerencsétlenség áldozata lett. Két diákot vezetett a Monte Cristallóra, s visszafelé egy teljesen veszélytelennek tűnő glecs-



Zwölferkofel. „Hiába mindig vonzó, ami nagy és még vonzóbb a nagyobb, azért aki dombra hágott hegyre kívánczik, s aki hegyen volt, az égbetörő sziklákra kapaszkodik.” (Eötvös)



A kedvenc hegyi vezető, Michael Innerkofler sírja

cseren haladtak, mikor Innerkofler alatt beszakadt egy átvezető hóhíd. Előrebukott, fejét beverte a hasadék túloldalán levő jégbe, minek következtében azonnal meghalt. Halála Eötvöst annyira megrázta, hogy ezután néhány évig nem mászott hegyet a Dolomitokban. Helyette Bosznia-Hercegovina hegyeit járta. 1892-ben azonban már ismét a Dolomitokat járja, a 90-es évek közepétől pedig már lányai is csatlakoztak hegymászó túráihoz.

Lányai, Rolanda és Ilona, örökölték apjuk sport- és természetszeretétét. A hegymászás alapjait a pilisi Kétágú-hegyen sajátították el, majd a Dolomitok következtek, ahol már tapasztalt hegyi vezetők segítségével tanulták meg a

hegymászás minden csíját-bínját. A hegymászással párhuzamosan megszerették a lovaglást és a kerékpározást is. 1895-től kezdve állandó és tevékeny résztvevői voltak a schluderbachi nyaralásoknak, sőt 1898-ban – apjuk ötven éve és kilencven kilója ellenére – óriási túrára vállalkoztak: kerékpáron indultak Schluderbachba. Egyes kortársak szerint tervüket eltítkolták anyjuk elől, miután ő hevesen ellenezte az óriási kerékpártúrát. Félrevezetése céljából felszálltak a vonatra, de Székesfehérváron leszállva felpattantak az előre elküldött kerékpárookra. Útjukról Zell am See-ből Bartoniek Gézának, az Eötvös-kollégium igazgatójának írt levelében Eötvös a következőképpen számolt be:

Kedves barátom!

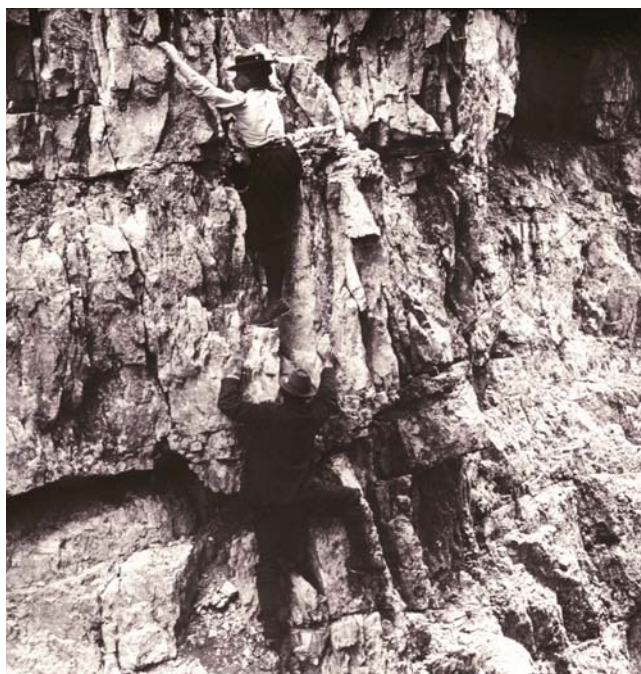
Minden baj nélkül programszerűleg tettük meg utunk első felét, 671 kilométert idáig. Két hét alatt, azaz Jul. 3-ikán értünk ide. Itt azonban elhagyott jó szerencsénk. Megeredtek az ég csatornái s öt nap óta napot nem láttunk. De hiszen itt amúgy is pihenni akartunk. Nehány nap múlva talán újra indulhatunk s Aug. 1-e körül Schluderbachban leszünk.

Bucsek Henrik, a neves magyar hegymászó a következőképpen értékeli Eötvös hegymászó tevékenységét: „Hegymászó működéséről a rendkívül kevés adat miatt pontos mérleget alkotni nem lehet. De kutatásaim eddigi eredményei nemcsak nagy, hanem páratlanul gazdag életműre is engednek következtetni. Óvatos becsléseim szerint magashegyi túráinak száma legalább 500-ra tehető. Legkevesebb 110 önálló csúcstól mászott meg. Első megmászásainak száma – ha a hágókat is beleszámítjuk – kb. 25–30 lehetett. Kb. ugyanennyi csúcsra mint második, harmadik vagy negyedik jutott fel. Ő maga mondta el egyszer, hogy a Croda da Lagot, a Zinnéket és a Sorapist 15-15 alkalommal mászta meg, a Monte Cristallot 19-szer. A Cadin csoportnak minden egyes csúcsát és hágóját megmászta.”

A „magyar professzor” a helybeli lakosság és a hegyi vezetők körében igen népszerű volt, nagyra becsülték alpinista eredményeit. Ennek köszönhető, hogy amikor 1902-ben Adolf Wizenmann német geológus és Josef Innerkofler elsőként jutott fel a Cadin második, nehezen megmászható, csúcsára, azt Eötvös, a neves tudós és hegymászó tiszteletére „Cima di Eötvös”-nek nevezték el. Wizenmann így indokolta névadó javaslatát: „Ezt a csúcst tartottam arra érdemesnek, hogy az Eötvös nevet maradandóan abban a szép hegy-



Mászóiskola az Albergo Misurina parkjában



A tanultak alkalmazása a Dolomitokban



Rolanda baronessz, a modern amazon

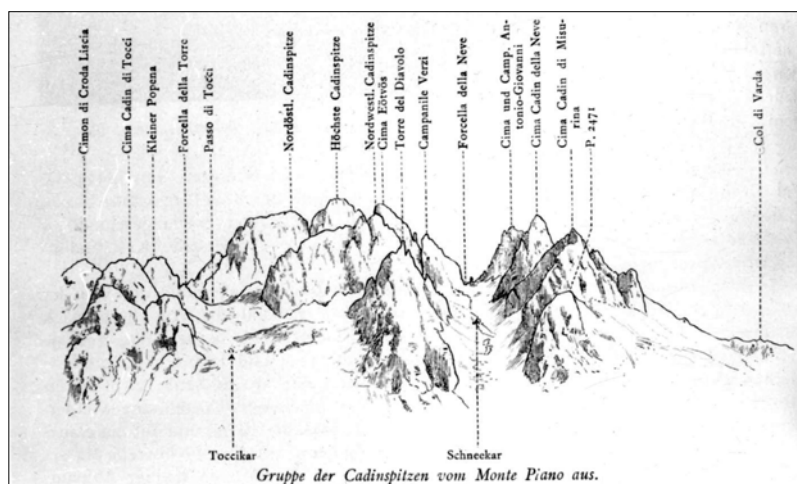
ségben megőrizze, melyben viselője negyedszázad óta kutatva és feltárva tevékenykedik. Sőt ehhez a névhez fűződik a nagyon híres Dolomitzinnék, a Zwölfer, az Elfer, a Croda da Lago és még sok másnak, és magának a Cadin-csoport több csúcsának első megmászása.” 1990-ben az ELGI turistái olasz, angol, német és magyar nyelvű emléktáblát helyeztek el az Eötvös-csúcs meredek délkeleti oldalán.

Eötvös maga is igen büszke volt hegymászó sikereire, bárati társaságban tréfásan többször is említette, hogy büszkébb azokra, mint tudományos eredményeire. A Cadin második legmagasabb csúcsának „Cima di Eötvös” elnevezése csak tovább növelte a család népszerűségét. A hegyi vezetők emléklappal fejezték ki Eötvös iránti tiszteletüket, aki mindig egyenrangú társként bánt velük, és egyben nagyvonalúságáról is ismert volt.

Többek között népszerűségének is köszönhető, hogy 1888-ban megválasztották a Magyarországi Kárpát Egyesület Budapesti osztálya, majd annak feloszlása után a helyébe lépő Magyar Turista Egyesület elnökévé. Elnöki tisztségét 1899-ben történő lemondásáig viselte. Az Egyesület közgyűlésein mondott elnöki beszédei mindig tartalmaztak költői fogalmazású igazságokat, például: „Turista az, aki útra kel azért, mert foglalkozásának egyformasága, gondjainak sokasága közepette álmaiban feltűnik előtte egy olyan szebb világ, melyben zöldebb a fű, kékebb az ég, magasabbak a hegyek, szebbek és különösebbek a házak, barátságosabbak az emberek, s aki ez álmok kép eredetijét fáradtságtól nem riadva keresi ... talán soha meg nem találja, de azért jókedvét el nem veszti, hiszen örömét éppen ez a keresés teszi.” Továbbiakat az ábrákon idézünk.



Turistainduló



Vázlat a Cadin-csoportról



„Nekem ez az ezerarcú Cadin örökszép gyönyörűségem” (Eötvös)



Ploner bácsi levele

Az Egyesület tagjai nagy szeretettel és tisztelettel övezték elnöküket, pl. a turistaindulót a szerző és a kiadó Eötvösnek ajánlva jelentette meg. Tiszteletük jeléül róla nevezték el a még elnöksége alatt épített és 1898 nyarán megnyílt első dobogókői fából épült menedékházat. Az eseményről a turisták lapja részletesen beszámolt: a turistaház három helyiségből állt, a középső nagy teremben főzésre alkalmas kály-



A hegyi vezetők emléklapja



Útban a Diavolo és a Gobbo csúcsa felé: „Feljutni a hegy tetejére ... fogaskerekű vasúton még nem turista érdem, de a magasba kapaszkodni, legyőzve minden akadályt, mely az emelkedésnek útjában áll, legyőzve különösen a testnek kényelmet szerető tunyaságát, ez már turistához méltó dolog.” (Eötvös)

kednie. A spártai körülmények és a szerzetesi szigor ellenére a turisták kedvelték a menedékházat, olyannyira, hogy néhány év múlva szűknek bizonyult, és nekiálltak egy kőből épített, nagyobb, ugyancsak Eötvös Loránd nevét viselő épület felhúzásának, melyet 1906 nyarán adtak át.

Visszatérve a Dolomitokhoz, 1914 júniusában az Eötvös család nem érkezett meg a megszokott időben Schluderbachba. Ploner bácsi aggódni kezdett, hogy mi történt kedves törzsvendégeivel. Szállodája levélpapírján írt levelében fejezi ki aggodalmait:

Igen tisztelt Báró Úr!

Nap mint nap vágyakozva várjuk Báró Úr érkezésétől az érteitést, de eddig semmi sem érkezett, ezért azzal az öszinte, szívélyes kéréssel fordulunk mi és minden schluderbachi Önhöz Báró Úr és nagyrabecsült családjához, kérem jöjjön



Katonai tábor a Dolomitokban



Eötvös lányaival csónakázik a Misurina tavon

ön és a baronesszek hamarosan újra Schluderbachba, mert különben nem lesz nyár: ...

Mire Eötvösék megérkeznek, a mellékelt felvétel tanúsága szerint a háborús hangulat szele a Dolomitokat is elérte. A későbbiekben kiderült, hogy nem volt indokolatlan a katonaság gyakorlatoztatása a sziklás hegyek között, mivel az első világháború egyik legkegyetlenebb hadszíntere éppen a Dolomitokban alakult ki.

A Dolomitok kapcsán feltétlenül meg kell emlékeznünk egy szakmai eseményről is. 1910-ben ugyanis a lassan már rutinná váló terepi mérések mellett Eötvös Loránd javaslatára munkatársai, Pekár Dezső és Fekete Jenő a tiroli Dolomitokban, Cimabanche mellett, a Monte Cristallo (3221 m) és a Croda Rossa (2965 m) közötti 1500 m magasan fekvő szűk völgyben torziósinga-méréseket végeztek. „Ennek a helynek a kiválasztásában...közrejátszott az előrelátható,



Felvonulás a mérésre, háttérben a Croda Rossa



Cortina d'Ampezzo, Osteria al Parco



Az ELGI turistái az emléktáblák előtt. Az emléktábla szövege: „E sziklacsoport 2837 méteres csúcsa Eötvös Loránd (1848–1919), a világhírű magyar természettudós nevét viseli, aki lelkes alpinista és a Dolomitok ismert hegymászója volt. Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, 1990.”

szokatlanul nagy gravitációs zavarok megfigyelésének a várársa” – írja Eötvös a mérésekről szóló beszámolójában. Az inga elméletéből nyilvánvaló volt, hogy a markáns topográfiai viszonyok nagymértékben torzítják a nehézségi erő potenciálfelületét, de Eötvösék a torzulás nagyságára és eloszlására voltak kíváncsiak. A mérések valóban érdekes eredményeket szolgáltatottak a völgy közép vonalában a potenciálfelület görbületi sugara 12267 km, azaz közel kétszerese, míg a völgy peremén 205 685 km, azaz több mint harminckétszerese az átlagos földsugár 6370 km-es értékének. Ez



Mária Terézia főhercegné oklevele



Az ELGI turistái az Eötvös-csúcson

különben a világ egyetlen, magashegységi környezetben végzett Eötvös-ingamérése.

Az első világháború kitörése után, 1915–16-ban az Eötvös család a Dolomitok helyett a Tátrát kereste fel, ahol Tarpatakfüredről kiindulva mászták meg a környező hegy-csúcsokat. A családfő különösen a Lomnici csúcsot kedvelte, melyet a Tátra Monte Cristallójának nevezett. 1917-ben megromlott egészségi állapota miatt azonban fel kellett hagynia a további túrázással.

Eötvös hegymászó kirándulásaihoz szervesen kapcsolódott a fényképezés iránti vonzalma. Korának kitűnő fotográfusa volt, és az elsők között volt, akik a fényképezést a műteremből kivitték a szabad természetbe. Hegyi túrái közben fotózta a környék festői részleteit, és nemegyszer a hajmeresztő hegymászási jeleneteket. A felvételeket többnyire állványra erősített kamerával üveglemezre készítette, aránylag kis lencsenyílással és hosszú expozícióval. Képei rendkívül élesek, olyannyira, hogy egyik előadásán azokat 5×5 m nagyságúra vetítették. 1895 után a felvételeket rend-



Dreischusterspitze

szerint tanársegéde, Pekár Dezső hívta elő, és ő készítette a nagyításokat is. Egy, a laboratóriumban összeállított nagyító segítségével több mint 100 db 40×50 cm nagyságú papírképet készítettek, melyek különböző fényképeszeti kiállításokon nyertek pályadíjakat, pl. az 1890-es első magyar amatőr fotókiállítás fővédnökének, az éppen esedékes trónörökös, Károly Lajos portugál származású feleségének, Mária Terézia főhercegnének elismerő oklevelét és aranyérmét. A nagyítások egy része Schluderbachban a Ploner-féle vendégfogadó termeit díszítette.

Eötvös főleg sztereoszkopikus képeket készített, amelyeken a térbeli hatást azzal fokozta, hogy ugyanazt a vidéket két, egymástól néhány méter távolságra lévő helyről fényképezte le, és a képeket egymás mellé másolva sztereoszkópban szemlélte. A hagyaték összesen 1880 db felvételt tartalmaz, melyeknek többsége sztereó. A felvételeket nem mind Eötvös készítette, de arra a következtetésre jutottunk, hogy közülük kb 1100–1200 db feltételezhetően Eötvös nevéhez fűződik.

Sajnos az üveglemezek minden rendszerezés nélkül maradtak ránk, egy részük a sok hányattatás közben megsérült. Ahhoz, hogy a felvételek rendszerezését megkezdjük, valamennyi felvételt sorszámmal kellett ellátni. Ezután következhetett a szinte megoldhatatlannak látszó feladat, a képek azonosítása. A felvételek egy kis hányadánál nem okozott gondot az azonosítás, mert magán a dián van feltüntetve annak tárgya, vagy az valahol már megjelent nyomtatásban, a helyszín megjelölésével. A képek túlnyomó részét utólag megpróbáltuk azonosítani. Ebben a munkában hegymászó kalauzok, útikönyvek, képeslapok, fényképek, videofelvételek és térképek sokaságára támaszkodtunk, de a legjelentősebb azoknak a személyeknek a hozzájárulása, akik maguk is aktív hegymászók és túráik során bebarangolták a Dolomitokat, így: Balog György, Csathó Beáta, Gulyás Ágnes, Kiss János, Körmendi Alpár, Szabó Zoltán, az ELGI munkatársai, Kis Domokos Dániel, Mészáros János, Mészárosné Kis Ágnes, az Országos Széchényi Könyvtár munkatársai, valamint Székely Kinga barlangász és Neidenbach Ákos hegymászó.

Az utóbbi években Pernetzky László, a KFKI kutatója rátalálván az ELGI virtuális múzeumában néhány Eötvös Loránd készítette fotóra, felesége társaságában nagy kedvvel és energiával kereste fel azokat a helyeket Schluderbach közelében, ahonnan Eötvös a virtuális múzeumban közölt fotóit készítette. Kirándulásairól 2009 áprilisában „Eötvös Loránd, a fotográfus nyomában a Dolomitokban” címmel a KFKI AEKI klubjában tartott nagyon érdekes előadást, melyben a beazonosított helyszínekről készített, azonos beállítású felvételeit mutatta be. Az előadás anyaga az interneten megtalálható.

Bejezésül egy színes apróság: az Eötvös-hagyatékban fellett üvegpozitív, amely Buffalo Bill vadnyugati szintársula-



Buffalo Bill társulatának előadása a Tattersallban

tának 1906. júniusi budapesti fellépésén készült. Az újságok már egy héttel a társulat érkezése előtt beharangozták a szenzációsnak ígérkező eseményt: „Buffalo Bill látványossága jövő héten érkezik Budapestre és 16-án kezdi meg érdekes előadásait a Tattersallban szabad ég alatt, de fedett nézőtérrel.” Ugyanakkor plakátok árasztották el a város utcáit a következő szöveggel: „Érkezik csak 9 napra! Naponta két előadás, délután 2½ órakor, este 8½ órakor. Az esti előadás semmiben sem különbözik a délutánitól. Minden ülés vízmentes vászonnal van védve.” Ez utóbbira szükség is volt, mert érkezésükkor ömlött a medárdi eső. A társulat június 16–24 között tartotta fellépéseit gyakorlatilag mindig telt ház (7500 fő) előtt. A turné olyan nagy feltűnést keltett, hogy József főherceggel az élén a magyar arisztokrácia színe-java megtekintette az előadást. Az esemény kapcsán Helldorfer Jenő a *Pesti Hírlap*-ban az alábbi versikét közölte:

Midőn beáll a nyári hő
Az indiánus Pestre jő,
És bevonul a Tattersallba,
Melyet egy hétig tart megszállva.

Fején hatalmas tarka toll,
Naponta kétszer lovagol.
Délután annak, aki gyermek,
Este viszont a felnőtteknek.

Nem tudhatjuk, hogy Eötvös olvasta-e e versikét a *Pesti Hírlap*-ban, és annak hatására határozta-e el az előadás megfigyelését, de a felvétel bizonyítja, hogy ott volt, alátámasztva jellemének nyitottságát a világ legkülönbözőbb dolgaira. Igazi reneszánsz ember volt!

A cikk szerzője

Szabó Zoltán

Felhasznált irodalom

- Barcza Imre (1927): Híres magyar hegymászók. Báró Eötvös Loránd. Turisták Lapja 39, 7–8, 144–146
- Bucsek Henrik (1969): Eötvös Loránd a hegymászó. Fizikai Szemle 8, 243–246
- Cholnoky Jenő (1944): Eötvös Loránd báró emlékezete. Turisták Lapja 56/6, 101–104
- Harkay Pál (1980): Eötvös Loránd, a hegymászó. Ég és Föld 3, 78–79
- Jász Géza (1920): Eötvös Loránd báró. Turisták Lapja 32/3–4, 50–54
- Kis Domokos Dániel (1998): A csúcson. A hegyek szerelmese, báró Eötvös Loránd. ELTE, Eötvös kiadó, Budapest, 225 p.
- Környei Elek (1964): Eötvös Loránd, a tudós és művelődéspolitikus írásaiból. Gondolat Kiadó, 425 p.
- Pápa Miklós (1998): Eötvös Loránd, a turista. Természetbarát Híradó 75. sz.
- Pekár Dezső (1941): Báró Eötvös Loránd. Az ötven éves torziós inga. Kis Akadémia kiadása, Budapest, 339 p.
- Perczel Olivér (2013): Buffalo Bill Magyarországon. FONS Forráskutatás és Történeti Segédtudományok, XX/3, 123–169
- Rosti Pál (1861): Úti emlékezetek Amerikából. Heckenast Gusztáv kiadása, Pest, 200 p.
- Thirring Gusztáv (1900): Budapest környéke. Gyakorlati kalauz kirándulók, turisták és a természet kedvelői részére. Magyar Turista Egyesület kiadványa, Budapest

Az MGE éves rendes közgyűlése

Tisztelt Tagtársunk!

Értesítjük, hogy a Magyar Geofizikusok Egyesületének Elnöksége az Egyesület éves rendes közgyűlését

2016. április 29-én 13:30 órakor

tartja a *Magyar Bányászati és Földtani Hivatal konferenciatermében* (Budapest XIV., Columbus utca 17–23.)

A Közgyűlés akkor határozatképes, ha azon a tagság 50%-a + 1 fő jelen van. Határozatképtelenség esetén az Elnökség az ismételt közgyűlésre 2016. április 29-én 14 órára hívja össze a tagságot. A megismételt közgyűlés az Alapszabály értelmében a jelenlévő tagok számától függetlenül határozatképes. A megismételt közgyűlés napirendje a meghíúsult közgyűlés napirendjével azonos.

Tervezett napirendi pontok:

- Elnöki megnyitó
- Titkári beszámoló és közhasznúsági jelentés az Egyesület 2015. évi tevékenységéről
- A Felügyelőbizottság beszámolója
- A Magyar Geofizikusokért Alapítvány Kuratóriumának és Felügyelőbizottságának beszámolója
- Hozzászólások
- Az Egyesület 2016. évi pénzügyi tervének előterjesztése
- *Szünet*
- Geofizikai érdekességek – szakmai előadások
- Tervek, javaslatok az Egyesület megújulására (az Eötvös-program elindítása)
- Kitüntetések átadása
- Az Ifjúsági Ankét díjainak átadása
- Zárszó

Horváth Zsolt
elnök

Eötvös Loránd síremlékének koszorúzása

A Magyar Geofizikusok Egyesülete és a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet a közös hagyományt folytatva ez évben is meg kívánja koszorúzni az alkalmazott geofizika tudományát megteremtő világhírű fizikusnak, Eötvös Lorándnak a síremlékét. A megemlékezésre a Közgyűlés délelőttjén, *április 29-én 11 órakor* kerül sor a Kerepesi úti temetőben (Budapest VIII., Fiumei út 16.).

A koszorúzásra idén is meghívjuk mindazon szervezetek és iskolák képviselőit, amelyek nevükben hordozzák a nagy magyar geofizikus emlékét. A koszorúzás után az iskolai csoportok egy részét vendégül látjuk az Intézet Columbus utcai épületében, ahol megismerkedhetnek az Intézet munkájával, és megtekinthetik az Eötvös Loránd Emlékgyűjteményt.



Eötvös Loránd síremléke a Fiumei úti Nemzeti Sírkertben

Ráner Géza, az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet nyugalmazott igazgatója, a Magyar Geofizikusok Egyesületének volt titkára 1940–2016

Mindig fájdalmas, ha egy munkatársunktól búcsút kell vennünk, és különösen fájdalmas, ha olyan kollégától kell búcsúznunk, aki egy teljes életet töltött el az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben, és hosszú szolgálati ideje alatt végigjárta a munkaköröket a terepi észlelőtől az igazgatói beosztásig.

Kollégánk, Ráner Géza 1940-ben született Győrben, ott járt iskolába, és a Révai Miklós Gimnáziumban érettségizett 1958-ban. Érettségi után a Miskolci Nehézipari Műszaki Egyetem Bányamérnöki Karára jelentkezett, ahol 1963-ban kitüntetéssel végzett bányageológus mérnökként. Első munkahelyének az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetet választotta, és innen is ment nyugdíjba 2002-ben. Ritka dolog, hogy valaki egyetlen munkahelyen töltse el egész aktív életét. Ritka, ugyanakkor sokat el is árul hűségéről, szakmászeregről, elhivatottságról. Gézát ugyanis – ahogyan abban a néhány évben megismerhettem –, amikor ő még ott volt az Intézetben és én is ott voltam már, ezek a tulajdonságok jellemezték.

Intézeti munkáját a Szeizmikus Osztályon terepi észlelőként kezdte, majd hamarosan egy terepi szeizmikus csoport csoportvezetője lett. 1970-ben a gyorsan növekvő intézetben a korábbi osztályok főosztályi rangot kaptak és a főosztályokon belül osztályok szerveződtek. A Szeizmikus Osztály Szeizmikus és Számítástechnikai Főosztállyá alakult, és ennek az akkora már komoly terepi kutatási tapasztalattal rendelkező Ráner Géza főosztályvezető-helyettese, valamint az ekkor létrehozott Hegyvidéki Szeizmikus Osztálynak az osztályvezetője lett. Ekkor vezet be a szervezeti egységeken átnyúló kutatási témacsoportok rendszerét is, amelynek a keretében Géza több terület témafelelőseként vesz részt a dunántúli, az észak-magyarországi, a mecseki kutatásokban és több vízföldtani kutatásban. Szakmai tevékenysége igen szerteágazó, számtalan jelentős örzi szorgalmas, lelkiismeretes és pontos munkájának eredményeit a Magyar Bányászati és Földtani Hivatal Adattárában. Munkáit itt nem sorolhatjuk fel mind, de két fontos kutatási témáját jelentőségük miatt mégis meg kell említenünk. Az egyik téma a „Földtani alapszelvek geofizikai vizsgálata” címet viselte, a másik a nukleáris-hulladék-lerakókkal kapcsolatos munkái voltak.

Az Intézet fejlődő külkapcsolatai 1973-tól Ausztriában és később Szlovákiában is egyre újabb kutatási megbízásokat

eredményeztek. Ezeknek a külföldi kutatásoknak Ráner Géza volt a vezetője, illetve főosztályi felelőse, és nagyon sokszor maga is részt vett a nemritkán nehéz hegyi terepen történő mérések végrehajtásában.

1985-ben az Intézet igazgatóhelyettese lett, majd 1991-ben már pályázati úton az Intézet igazgatói beosztását nyerte el. 1994-ig vezeti az Intézetet, erre az időszakra esnek az Intézet

talán legnehezebb évei. A rendszerváltást követő éveknek a nem akadémiai kutatóintézeteket ellehetetlenítő és felszámoló politikája az ELGI-t sem kerüli el. Brutális és indokolatlan leépítést követeltek az Intézet-től, amelyet neki kellett végig vinnie.

1994 után visszatért a geofizikai kutatószokhoz, és tudományos főmunkatársként ismét fontos földtani kutatási témák felelős vezetője volt egészen nyugállományba vonulásáig.

A rábízott feladatokat mindig példamutató szaktudással és lelkiismeretességgel oldotta meg. Szerette és fontosnak tartotta szakmáját, a szakmai munka örömet jelentett a számára. Ez nem került el felettesei figyelmét sem: 1967-ben a Központi Földtani Hivatal elnöke dícséretben részesíti, majd a következő évben a „Földtani kutá-

tás kiváló dolgozója” érdemrendet adományozza neki. Nem teljesen egy évtized múlva, 1975-ben tevékenységét kormánykitüntetéssel, a Munka Érdemrend bronz fokozatával ismerik el. Az Intézetért végzett munkájáért 2000-ben a „Pro Geophysica” emlékérmét vehette át.

Ráner Géza a szakmai közéletben is részt vett. Tagja volt a Magyarhoni Földtani Társulatnak és a Magyar Geofizikusok Egyesületének. Az utóbbinak 1974-től 1990-ig titkára is volt, egyesületi munkájáért 2004-ben a Magyar Geofizikusok Egyesületének tiszteleti tagjává választották.

Gézától, a barátától és kollégától búcsúzni kényszerülünk most! Ne feledjük azonban, hogy hazánk geofizikai kutatása során elért eredményei, a ma már sok esetben megismételhetetlen méréseinek adatai itt maradnak nemzeti adatbázisaink felbecsülhetetlen értékű kincseiként! De a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, a geofizikus kollégák és a jó barátok emlékezete nemcsak munkáinak eredményeit, hanem példamutató munkaszeretétét, szorgalmas és lelkiismeretes személyét is őrizni fogja.

Fancsik Tamás



Ráner Géza
1940–2016

Dr. Bencze Pál,
tudományos tanácsadó, kutatóprofesszor, c. egyetemi tanár,
a Magyar Geofizikusok Egyesületének alapító tagja

1929–2016

**2003 előtt MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet (MTA GGKI),
jelenleg MTA CSFK GGI (Sopron)**

Alig töltötte be 86. életévét 2015. november 24-én, mintegy két hónapra rá, 2016. január 29-én elhunyt a fenti intézmény meghatározó kutatói személyisége, az egymásba átalakuló egyetemi, majd akadémiai intézmény egyik alapító tagja, kedves munkatársunk, Bencze Pál.

A hazai és nemzetközi tudományos élet, a geofizika, a meteorológia és az űrkutatás kiváló, elismert szakemberének tartotta.

1953-ban kitüntetéssel diplomázott a Soproni Műszaki Egyetemen mint geofizikus mérnök. Kutatásait a Nagycenk melletti – ma Széchenyi Istvánról elnevezett – elektromágneses obszervatórium lég-elektromos, ionoszférás műszerezése után főként a felső légkör kutatásával teljesítette ki. (Csak rövid megjegyzés: 1956-ban az obszervatórium helyét a Fertő partján ő jelölte ki.)

Kutatási eredményeiről hazai és nemzetközi folyóiratokban számos – részben társszerzős – tanulmánya jelent meg. Ezek alapján írt értekezéseivel a TMB-n kandidátusi, majd akadémiai doktori fokozatot szerzett. Az MTA GGKI-ben nyugdíjazásáig vezette az Aeronómiai Osztályt.

Bencze Pál – szinte utolsó leheletéig – lelkes oktató volt. Kezdetben az ELTE Meteorológiai, majd Geofizikai Tan-

székén, ahol egyetemi tanári címet kapott, majd a Nyugat-magyarországi Egyetemen, amelynek az MTA GGKI-be kihelyezett tanszékét egy évtizedig, 1999-ig vezette, aktívan részt véve a környezettudományi képzésben. Élete utolsó

szakaszában, szinte 80. évének betöltésétől a BME-n űrkutatói szemináriumot vezetett. Ez utóbbi eredményeként írta meg legújabb könyvét „Bevezetés a Nap–Föld fizikába” címmel. Évtizedeken keresztül aktív szervezője volt a hazai ionoszféra, magnetoszféra szemináriumoknak is.

Munkásságát számos magas kitüntetéssel ismerték el. Ezek közül az űrkutatással kapcsolatosak mellett a Magyar Geofizikusok Egyesülete tiszteleti tagságát, a Renner János-, az Egyed László- és az Eötvös Loránd-érmeket és főként a Magyar Tudományos Akadémia egyik legnagyobb kitüntetését, az Eötvös-koszorút kell megemlítenünk.

Emlékét mint kedves, mindig segítőkész jó barátát valamennyi szak- és munkatársa őszinte szeretettel és megbecsüléssel őrzi.

*Ádám Antal,
Wesztergom Viktor*



Dr. Bencze Pál
1929–2016

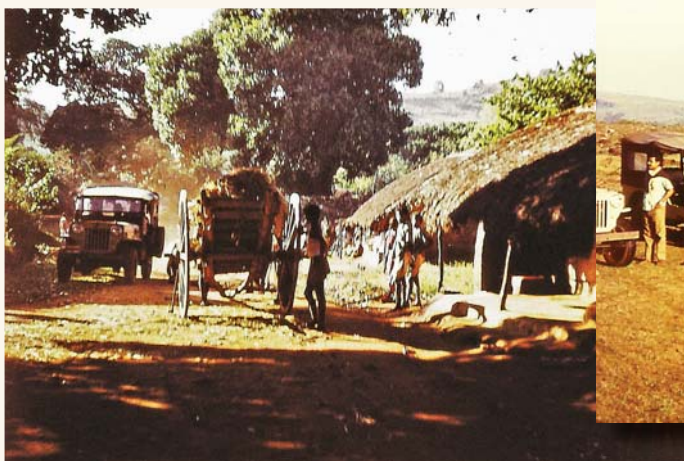
Rendezvéynaptár

2016. április		
ápr. 14. 14.00 óra	Dank Viktor köszöntése 90. születésnapja alkalmából (az MFT ünnepi szakülése)	Budapest, MFGI díszterem (Stefánia út)
ápr. 17–22.	EGU General Assembly 2016 (www.egu2016.eu)	Bécs, Ausztria
ápr. 20. 10.00 óra	Az „Ásványvagyon-gazdálkodási fórum” 5. előadói ülése	Miskolc, MAB székház
ápr. 20. 14.00 óra	„Földtudományi határterületek” 2016/3. előadói ülése Téma: nap-, szél- és geotermikus-erőműparkok kialakítására alkalmas területek kiválasztási szempontjai Társrendező: Magyar Meteorológiai Társaság	Budapest, MFGI díszterem (Stefánia út)
ápr. 21–22.	„A Föld Napja”: az MFGI diákoknak szóló kétnapos szakmai bemutatója	Budapest, MFGI Stefánia- úti épülete
ápr. 29. 11.00 óra	Eötvös Loránd síremlékének hagyományos megkoszorúzása	Budapest, Nemzeti Sírkert (Kerepesi Temető)
ápr. 29. 13.30 óra	Az Egyesület rendes évi közgyűlése	MBFH konferenciaterem (Budapest, Columbus u.)
2015. május		
máj. 10–13.	Geoinformatics 2016: 15th International Conference on Geoinformatics (www.eage.org)	Kiev, Ukrajna
máj. 18. 14.00 óra	„Földtudományi határterületek” 2016/4. előadói ülése Téma: felszín alatti vízbázisok modellezése, hatásterület meghatározása Társrendező: Magyar Hidrológiai Társaság	Budapest, MFGI díszterem (Stefánia út)
máj. 30. – jún. 2.	78. EAGE kongresszus és műszerkiállítás (www.eage.org)	Bécs, Ausztria
2016. június		
jún. 25–29.	SPWLA 57th Annual Symposium (www.spwla.org)	Reykjavik, Izland
2016. augusztus		
aug. 1–3.	Unconventional Resources Technology Conferences (URTeC 2016) SPWLA partnering with AAPG, SPE, and SEG (www.urtec.org)	San Antonio, Texas, USA
2016. szeptember		
szept. 4–8.	21. Near Surface Geoscience 2016 (21. konferencia) (www.eage.org)	Barcelona, Spanyolország
2016. október		
okt. 16–21.	SEG műszerkiállítás és 86. évi kongresszus (www.seg.org)	Dallas, Egyesült Államok

További részletek, referenciák a honlapról (www.mageof.hu) érhetők el.

Kakas Kristóf

India, 1976



Még lakott területen járunk



Munka a fennsíkon



A tábor: a főgeológus asszony leányaival

Bauxitkutatás a Keleti-Ghatokban



Hazafelé a dzsungelben

MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETE

1145 Budapest, Columbus u. 17-23.; Tel./Fax: (1) 201-9815

E-mail: postmaster@mageof.t-online.hu; Honlap: www.mageof.hu

